



TITLE:

底泥の再浮上機構に関する基礎的研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

大坪, 国順

CITATION:

大坪, 国順. 底泥の再浮上機構に関する基礎的研究. 京都大学, 1985, 工学博士

ISSUE DATE:

1985-05-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r5615>

RIGHT:

底泥の再浮上機構に関する基礎的研究

昭和 59 年 11 月

大 坪 国 順

底泥の再浮上機構に関する基礎的研究

昭和 59 年 11 月

大 坪 国 順

目 次

| | |
|------------------------------|----|
| 第1章 序 論 | 1 |
| 第2章 流送実験の方法および底泥の基本的物性 | 5 |
| 第2.1節 概 説 | 5 |
| 第2.2節 流送実験の方法 | 6 |
| 2.2.1 流送実験装置 | |
| 2.2.2 実験方法およびその手順 | |
| 第2.3節 限界掃流力の実験 | 8 |
| 第2.4節 飛び出し量の実験 | 9 |
| 第2.5節 底泥の概観 | 10 |
| 第2.6節 流送実験に用いた底泥の基本的物性 | 12 |
| 2.6.1 底泥および粘土の種類 | |
| 2.6.2 粒度分布 | |
| 2.6.3 比重と灼熱減量比 | |
| 2.6.4 コンシステンシー指数 | |
| 第2.7節 結 論 | 17 |
| 第3章 底泥の限界掃流力 | 19 |
| 第3.1節 概 説 | 19 |
| 第3.2節 実験結果 | 19 |
| 3.2.1 流送限界と破壊限界 | |
| 3.2.2 浮上粒子の大きさ | |
| 3.2.3 底泥の種類の影響 | |
| 3.2.4 含水比の影響 | |
| 3.2.5 含有有機物の影響 | |
| 第3.3節 底泥の流送形態 | 23 |
| 3.3.1 流送形態による底泥のグループ区分 | |
| 3.3.2 第一底泥グループの流送形態の特徴 | |
| 3.3.3 第二底泥グループの流送形態の特徴 | |
| 3.3.4 底泥の代表的な流送形態 | |
| 3.3.5 流送形態に及ぼす澱粉および寒天含有の影響 | |
| 第3.4節 二つの底泥グループと限界掃流力 | 27 |
| 3.4.1 限界掃流力と流動特性の関係 | |
| 3.4.2 二つの底泥グループの特徴 | |

| | | |
|-------|-----------------------|----|
| 3.4.3 | 限界掃流力と底泥の基本的物性との関係 | |
| 第3.5節 | 限界掃流力に関する理論的考察 | 34 |
| 3.5.1 | 流送抵抗力 | |
| 3.5.2 | 初期移動機構 | |
| 3.5.3 | 限界掃流力に及ぼす重力の影響 | |
| 3.5.4 | 底泥の限界掃流力 | |
| 第3.6節 | 結 論 | 42 |
| 第4章 | 底泥の飛び出し率 | 44 |
| 第4.1節 | 概 説 | 44 |
| 第4.2節 | 実験結果の概要 | 44 |
| 第4.3節 | 連行係数 | 45 |
| 第4.4節 | 無次元飛び出し率 | 48 |
| 4.4.1 | 飛び出し率と掃流力に関する無次元量 | |
| 4.4.2 | 基準時間 | |
| 4.4.3 | 代表密度および代表粒径 | |
| 4.4.4 | 飛び出し率の無次元表示 | |
| 第4.5節 | 飛び出し率に関する理論的考察 | 52 |
| 4.5.1 | 底泥粒子の運動方程式 | |
| 4.5.2 | 底泥粒子の移動速度 | |
| 4.5.3 | 無次元飛び出し率の定式化 | |
| 4.5.4 | 無次元飛び出し率の推定式と実験結果との比較 | |
| 4.5.5 | 無次元飛び出し率による流送限界の再評価 | |
| 第4.6節 | 研究成果と問題点 | 61 |
| 第4.7節 | 結 論 | 62 |
| 第5章 | 底泥の流動曲線 | 64 |
| 第5.1節 | 概 説 | 64 |
| 第5.2節 | 実験条件および方法 | 65 |
| 5.2.1 | 粘度計 | |
| 5.2.2 | 測定方法 | |
| 5.2.3 | 底泥の種類 | |
| 第5.3節 | 流動曲線の特徴 | 67 |
| 第5.4節 | 流動特性の実験結果 | 68 |
| 5.4.1 | 底泥の種類の影響 | |
| 5.4.2 | 含水比の影響 | |
| 5.4.3 | 吸着陽イオンの影響 | |
| 5.4.4 | 泥温の影響 | |
| 第5.5節 | 底泥の粘度と降伏値 | 73 |

| | | |
|-------|-------------------|-----|
| 5.5.1 | 底泥の粘度 | |
| 5.5.2 | 底泥の降伏値 | |
| 第5.6節 | 他の物性量との関連 | 77 |
| 第5.7節 | 結 論 | 77 |
| 第6章 | 底泥の沈降特性 | 79 |
| 第6.1節 | 概 説 | 79 |
| 第6.2節 | 実験条件および方法 | 80 |
| 第6.3節 | 底泥の沈降形態 | 80 |
| 第6.4節 | 界面および沈積面の時間変化 | 82 |
| 6.4.1 | 界面および沈積面の時間変化曲線 | |
| 6.4.2 | 界面沈降に及ぼす底泥の種類の影響 | |
| 第6.5節 | 土粒子の分散および凝集 | 84 |
| 第6.6節 | 最終状態の特性 | 87 |
| 第6.7節 | 沈降特性に関する理論的考察 | 89 |
| 6.7.1 | 沈降曲線 | |
| 6.7.2 | 圧密沈降に関する理論 | |
| 6.7.3 | 最終状態での底泥層の鉛直濃度分布 | |
| 第6.8節 | 結 論 | 95 |
| 第7章 | 現地調査および現地観測 | 97 |
| 第7.1節 | 概 説 | 97 |
| 第7.2節 | 調査および観測の概要 | 97 |
| 7.2.1 | 底泥の現地調査 | |
| 7.2.2 | 底泥の再浮上に関する現地観測 | |
| 第7.3節 | 底泥の物性の分布特性 | 98 |
| 7.3.1 | 鉛直分布特性 | |
| 7.3.2 | 水平分布特性 | |
| 7.3.3 | 季節変化 | |
| 第7.4節 | 堰ヶ浦における堆積速度 | 103 |
| 第7.5節 | 底泥の再浮上に関する現地観測 | 105 |
| 7.5.1 | 風向・風速の特性 | |
| 7.5.2 | 潮流の特性 | |
| 7.5.3 | 波の特性 | |
| 7.5.4 | 濁度の特性 | |
| 第7.6節 | 結 論 | 109 |
| 第8章 | 底泥の再浮上現象のシミュレーション | 112 |
| 第8.1節 | 概 説 | 112 |

| | | |
|-------|--------------------------|-----|
| 第8.2節 | 現地での底面せん断応力 | 112 |
| 8.2.1 | 実効掃流力 | |
| 8.2.2 | 底泥の飛び出し率に及ぼす実効掃流力の変動の影響 | |
| 第8.3節 | 湖内での底泥の収支 | 118 |
| 8.3.1 | 物質収支式とそれに伴う仮定 | |
| 8.3.2 | 規準面と規準面濃度について | |
| 第8.4節 | 底泥層内の含水比の鉛直分布の影響 | 124 |
| 第8.5節 | 底泥の再浮上に関するシミュレーション | 126 |
| 8.5.1 | シミュレーションの手順 | |
| 8.5.2 | シミュレーション結果の考察 | |
| 第8.6節 | 結 論 | 130 |
| 第9章 | 結 論 | 135 |

第1章 序 論

近年、湖などの富栄養化現象に拘る底泥の役割についての関心が高まっている。底泥はある意味では物質の収納庫のようなものであり、水環境の汚染につながる物質も含んでいる。

底泥は、湖沼等に堆積しても、底質層として静的な状態で存在しているわけではなく、時にはその上部の水圏との間で、物理的・化学的な作用による物質の交換を行う。この交換によって新たな形態の水質汚濁が生ずることがある。

霞ヶ浦のように浅くて大きな湖では、湖の富栄養化に与える底泥の影響はかなり大きなものと考えられる。特に夏期にかなりの量の栄養塩が底泥から供給されることが明らかとなった。^{1), 2), 3), 4)} しかしながら、実際にどの程度の栄養塩類が底泥から回帰しているかを測定することは難しく、実際に使用できるデータはなかなか得難い。湖内での栄養塩の循環のシミュレーションにおいても、底泥から湖水への栄養塩移行経路は未知項として処理されているのが現状である。⁵⁾ 一般に底泥の物質が水圏に移動する形態には二通りが考えられる。一つは溶出型と呼ばれ、底泥粒子そのものの移動はなく、底泥の間隙水中に存在する溶存態物質が化学的および生物的作用と上部の流れによって、主として拡散現象として底質層から水圏へ放出されるというものである。他の一つは攪乱型と呼ばれ、上部の水流から受ける流体力より底泥そのものが浮上し、それに伴って底泥間隙水中に溶存している物質が水圏に放出されるというものである。浅い湖では風などの影響で底泥が攪乱される可能性が強く、それによる栄養塩類の回帰はかなり多いものと考えられる。湖沼での風による底泥の浮上は、霞ヶ浦、諏訪湖、手賀沼、印旛沼およびエリー湖⁶⁾などで観測されている。また、エスチャリーでは潮流などの流れによる底泥の浮上が報告されている。^{7), 8), 9)}

底泥の攪乱・浮上の要因として、水流のほかに底引き網などの漁業活動、ハゼ等の底生魚類の活動も挙げられるが、本研究では研究対象を流れによる底泥の浮上に限定した。底泥の浮上に伴う栄養塩類の回帰量を評価するためには、底泥の浮上量（浮上厚さ）、底泥中の間隙の比率および間隙水中の栄養塩類の濃度等の解明が不可欠となる。現地において底泥粒子は、沈降・浮上を繰り返しているが、その現象の概要は図 1-1 のようである。現地での底泥の浮上量を推定するためには、まず図 1-2 に示される四つのサブシステムを解明する必要がある。各サブシステムが明らかにされ、それらの知見を有機的に結びつけることにより、初めて底泥の浮上量の推定が可能となる。四つのサブシステムとは、I. 底泥の初期移動機構（限界掃流力および飛び出し率）、II. 底泥の沈降・圧密機構、III. 底泥床面上の流れ（剪断応力）特性、および IV. 再浮上した底泥粒子の挙動である。特に、サブシステム II は底泥床面の特徴で、堆積した底泥は自重圧密により深さ方向に含水比が低下しており、それに伴い限界掃流力や飛び出し率の特性も鉛直分布方向に変化している。現地での底泥の浮上量を推定するためには、これらの鉛直方向の分布を考慮した解析が必要となる。

本研究では、四つのサブシステムのうちサブシステム I および II の解明に第一の主眼をおいた。即ち、底泥の限界掃流力と飛び出し率の定式化ならびに底泥の自重圧密機構の解明で

ある。また、現地調査および観測による底泥の堆積状態や沈降・再浮上の実態の解明も行った。さらに、サブシステムIIIおよびIV についての簡単な数理モデルと、サブシステム I およびIIの知見をもとに、霞ヶ浦高浜入を対象とした底泥粒子の沈降・浮上に対するシミュレーションモデルを構築した。そして、モデル化の際導入した二、三のパラメータの値を現地観測データをもとに検討した。

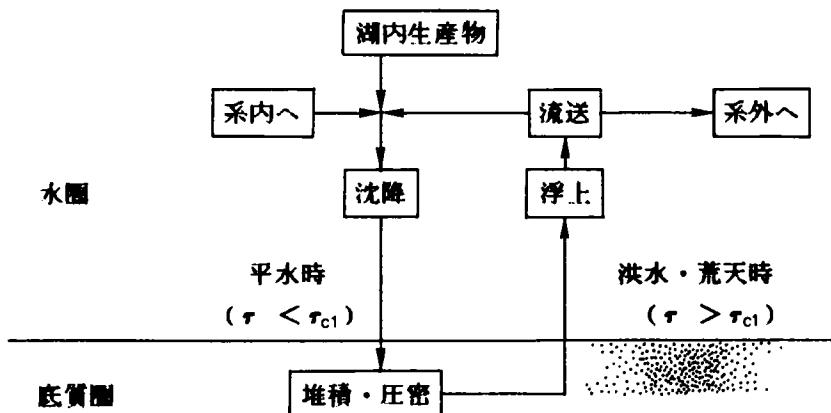


図 1-1 底泥粒子の沈降・浮上過程の模式図

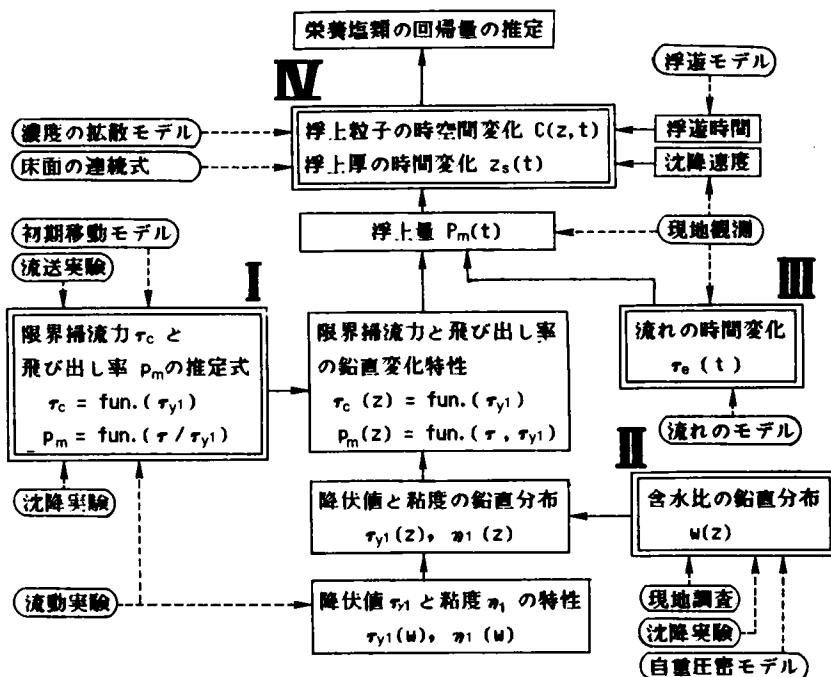


図 1-2 サブシステムの説明図

底泥粒子は微細でかつ膠結物質を多量に含むので、表面力である粘着力が強く作用しているのが特徴である。そのため流送に抗する力も、重力より粘着力に帰因するものが支配的になる。粘着力は底泥の含水比により大きく変化するため、限界掃流力や飛び出し率も含水比の影響を強く受け、かなり複雑な様相を呈する。粒子間の粘着力に影響を及ぼす因子は、粘土の種類やその構成比に始まり、塩分濃度、吸着陽イオン、有機物などの膠結物質等様々なものがあり、それらが相互に関連し合っている。これら全ての因子の影響を独立に評価することは不可能に近い。また、粘着力をミクロな粒子レベルで理論的に評価することも非常に難しい。そのため、今日まで限界掃流力や飛び出し率を各種の底泥に対して包括的に定式化できた研究はない。そこで著者は、これら諸因子の粘着力への影響を反映する物性項目を見出し、その項目と限界掃流力および飛び出し率との関係を解明することを試みた。本論文の第2章から第6章までは、その過程における各種の実験ならびに理論的解析を通して得られた研究成果を取りまとめたものである。

本論文の各章の内容は次のようである。

第2章では、底泥の限界掃流力および飛び出し率を求めるための流送実験の意義、装置、方法および条件について述べた。次に本研究で用いた底泥の基本的性質を底泥の粒度、比重、灼熱減量比およびコンシステシー指数の観点から述べた。

第3章では、底泥の限界掃流力について考察した。まず、底泥の限界掃流力の実験結果について述べた。その中では主に、著者が新たに定義した流送限界および破壊限界という二つの限界掃流力の定式化について検討した。また、その際不可欠な要素となる底泥における二つのグループの存在と、その特徴について述べた。さらに底泥の限界掃流力の理論的考察として、底泥粒子の主要な離脱様式や流送抵抗力について検討した。

第4章では、底泥の飛び出し率について考察した。最初に飛び出し量の実験結果に基づいて、底泥の浮上現象については粒状体的取り扱いが適当なことを示した。次に次元解析的考察により、底泥の粘度と降伏値によって底泥粒子の飛び出し率を実験的に規定した。さらに粘度に帰因する流送抵抗力を考慮した底泥粒子の離脱に関する運動方程式を立て、さらにせん断応力の変動を考慮することによって、底泥の無次元飛び出し率の推定式を誘導し、実験結果との比較を行った。

第5章では、底泥の流動特性について実験的な考察を進めた。流動特性は二つの底泥グループを分類する上で重要な指標であり、底泥の浮上・流送現象とも深い関係を持つと考えられる。ずり速度を連続的に変化させて底泥の流動曲線を求め、二つの底泥グループごとの流動曲線の特徴を明らかにし、その理由を考察した。さらに各グループの流動曲線に対し粘度および降伏値を定義し、それらを規定する因子について検討した。

第6章では、底泥の沈降特性について考察した。底泥の沈降形態も二つの底泥グループを分類する上で有力な指標である。沈降特性に及ぼす底泥の種類、初期含水比および初期沈降高さの影響を検討した。また、二つの底泥グループで沈降形態に違いが現れた理由を考察し、それを実験的に確認した。

さらに、現地での底泥の含水比の鉛直分布の推定に必要な基礎的知見を得るために、底泥の自重圧密について考察し、最終沈降状態での底泥層内の含水比（濃度）の鉛直分布形を与える式を導いた。

第7章では、霞ヶ浦西浦における底泥の堆積状態に関する現地調査と底泥粒子の沈降・浮上現象の実態に関する現地観測の結果について述べた。また、西浦湖心部における堆積速度についても検討した。

第8章では、第6章までに得られたサブシステム I, IIに関する知見とサブシステム III, IVに対して与えた簡単な数値モデルにより、底泥粒子の沈降・浮上現象に対するシミュレーションモデルを組み立てた。また、底泥層内の含水比の鉛直分布が底泥の浮上現象に及ぼす影響について検討した。そこで得られた知見を参照し、霞ヶ浦高浜入を対象として底泥の再浮上に関するシミュレーションを行った。その中で、サブシステム IIIのモデルとして底泥床面上のせん断応力を確率過程として取り扱った。その際導入される二、三のパラメータの値が、シミュレーション結果に及ぼす影響を現地観測結果との比較などを通じて検討した。

第9章では、各章で得られた知見をまとめて結論とした。

参考文献

- 1) 浜田篤信・津田勉(1976): 霞ヶ浦の富栄養化に関する研究 III - 窒素収支について -, 茨城県内水面水産試験場調査研究報告, 第13号, 29-43.
- 2) 相崎守弘(1981): 霞ヶ浦の物質循環における底泥の役割, 国立公害研究所調査報告, 第16号, 95-104.
- 3) 相崎守弘・大槻晃・海老瀬潜一・安部喜也・岩熊敏夫・福島武彦(1981): 霞ヶ浦高浜入における栄養塩収支, 国立公害研究所研究報告, 第22号, 281-308.
- 4) 岩熊敏夫・今村典子・花里孝幸・安野正之・大槻晃・相崎守弘(1982): 湖内実験隔離水界を用いた水質回復実験, 国立公害研究所調査報告, 第21号, 15-35.
- 5) 福島武彦(1982): 霞ヶ浦における栄養塩の循環, 国立公害研究所調査報告, 第22号, 3-20.
- 6) Sheng, Y. P. and W. Lick (1979): The transport and resuspension of sediments in a shallow lake, J. Geophys. Res., 84, (C4), 1809-1826.
- 7) 鷺見栄一(1974): エスチャリーにおける懸濁物質の浮遊機構 (I), 第21回土木学会海岸工学講演会講演論文集, 181-186.
- 8) 村岡浩爾(1974): 流れによる底泥浮上と水質との関連, 第18回土木学会水理講演会講演論文集, 181-186.
- 9) 白石英彦・大西亮一(1976): 潮流による底泥の浮き上がりおよび浮遊土砂の拡散, 第23回土木学会海岸工学講演会講演論文集, 189-194.

第2章 流送実験の方法および底泥の基本的物性

第2.1節 概 説

粘着性土の流送現象は、粘着性土表面に作用する流体力と、粘着性土の移動抵抗力の競合現象として捉えられる。粘着性土の流送特性の最大の特徴は、移動抵抗力が表面力に起因していることである。これは、粘着性土の場合、個々の土粒子径が微細であるため、重力抵抗よりコロイドの性質からくる表面力が支配的となることによる。表面力はここでは粘着力と換言されるもので、電気化学的、化学的および物理学的な粒子間力である。そのため、粘着性土の流送特性は交換性陽イオン・有機物量・含水比および飽和度等の影響を大きく受ける。含水比と飽和度の影響は少し複雑で、同一粘着性土においても飽和度によって含水比の流送抵抗力への影響は逆になる場合もある。¹⁾

粘着性土の流送に関する研究は、水理学的立場と農学・土壌学的立場から始まった。前者は、運河の安定河道の問題であり、後者は土壌の侵食の問題であった。前者の研究では、主に飽和（水和）の状態の粘着性土に対して、流送に関する限界流速や限界掃流力を土の力学的特性、すなわち、ペーンせん断強さ・一軸圧縮強さ・コンシステンシー指数等と関連づける方向に研究が進んだ。後者の研究では、不飽和状態の粘着性土に対して、土壌の分散比および粘土含有率と耐侵食性、交換性陽イオンおよび電解質の種類と侵食速度との関係が主な研究テーマとなった。「Erosion of Cohesive Sediments」と銘打った A.S.C.E.（アメリカ土木学会）の Task Committee の報告書（1968）の中で紹介されている研究は、ほとんどが上記のようなものであった。²⁾ しかし、Task Committee が報告書の中で述べているように、粘着性土の erosion resistance を支配する特性が十分明らかにされたとは言い難い。

一方、1961年に Einstein & Krone³⁾ によってエスチャリーにおける底泥の輸送特性に関する研究が発表されたのを発端に、1965年以降は研究の対象が底泥に移行した。それまでは液性限界以下という含水比が低く比較的固い粘着性土が研究対象であり、流送抵抗力に対する含水比の影響は考慮されなかった。1965年頃から、流送特性を支配する因子として含水比が取り入れられるようになってきた。研究の内容も底泥の限界掃流力に関するものの他に、エスチャリーにおける非定常流れによる底泥の沈降・浮上現象に関するものが増え、現地観測や濁度の時間変化に関する数値シミュレーションなどの研究も行われるようになった。⁴⁾

しかし、底泥の流送に関する研究は、流送特性の基本量である底泥の限界掃流力や飛び出し率を取ってみても、それらを明確に定量化したものは皆無と言っても過言ではない。底泥の限界掃流力を実験的にせよ統一的に求めた論文としては Migniot⁵⁾ の研究しかなく、飛び出し量もしくは侵食速度とせん断応力との関係式は、研究対象とした個々の底泥に対しては求め得ても、統一的なものを提示したものは一篇もないのが現状である。⁶⁾ これは底泥が微細粒子であり、砂粒のように粒子に作用する力を流体力と重力のみに限定できず、粘着力や

凝集力などの表面力が支配的になるためである。底泥は通常水和の状態で存在しているが、粘着力や凝集力は水和の程度によって変化し、底泥の種類によっても異なるために、底泥の粒子間に作用する力を内部機構まで立ち入って定量的に把握するのは、現状では不可能である。土粒子の分散・凝集を説明する土粒子周辺の電気ポテンシャルの分布なども単純理想化した状態での理論であり、それらは粒子間の相互作用についてある程度の原則を示してはくれるが、実際の粘着性土に対してその粘着力や凝集力を定量的に評価することはできない。限界掃流力や飛び出し率を問題にする際、土粒子に作用する力の大きささえ規定できれば、この問題を静的釣り合いや運動論的に論議できるが、支配力である表面力の評価が非常に困難であるために、これらの問題に関する研究は、現象論的、個別的研究の範囲に止まらざるを得なかった。

研究における実験の位置づけとしては、二つの立場がある。一つは、演繹的に導かれた理論なり結論を実証する立場、他の一つは、理論や結論を帰納するために必要な事実を実験によって与える立場である。底泥の流送問題に関しては、上記の理由により理論や結論を演繹することは不可能であるので、まず実験によって何らかの事実を得ることに主眼をおかざるを得ない。粒子間の粘着力や凝集力に影響を及ぼす因子は、粘土の種類や構成比から始まり塩分濃度および交換性陽イオンなど様々なものがあり、それらが相互に関連し合っている。これらの全ての因子の影響を、実験によって逐一評価するためには膨大な実験量となるし、たとえそのような実験を行っても、その結果から各因子ごとの影響を独立に評価できるとは考えにくい。そのため、これらの諸因子の影響を包括した物性項目を見い出すことと、その物性項目と限界掃流力および飛び出し率との関係を明らかにすることが最も有効な研究方法と考えられ、流送実験もその線に沿った内容にする必要があった。従来の研究結果から、限界掃流力は底泥の種類（液性限界、塑性指数、分散比などで代表される）のみならず、含水比によっても大きく変化することは明らかである。そのため流送実験では、底泥の種類と含水比を変化させた実験条件を設定した。流送実験は限界掃流力を求める実験と飛び出し量を求める実験に大別される。これらの実験を始めるにあたり、底泥の流送特性に関しては流送形態を始めとして何の知識も持っておらず、限界掃流力の判定すらその基準が不明であった。そのため、流送形態の特徴と絡み合わせて限界の定義や基準を決め、二つの限界状態を求めた。限界掃流力および流送形態の特性を把握した後に、飛び出し量を求める実験を行った。

第 2.2 節 流送実験の方法

2.2.1 流送実験装置

流送実験に用いた水路は、透明アクリル製の長方形断面（幅 15cm×高さ 5cm）管水路である。全長は約 10m、長方形断面部の長さは 7m である。長方形断面部の上流端から 4.5m 下流に、長さ 90cm×幅 10cm×高さ 2cm の移動床区間がある。固定床は、底泥の表面状態が滑面（平坦床の場合）であることから、アクリル壁のままにした。移動床部の 50cm 下流に流れを強制的に攪拌させる区間を作り、さらにその約 30cm 下流に濁度測定区間と採水孔を設けた。管路には、1m ごとに圧力測定用タップを取り付けた。水の循環系統は循環方式でも排水

方式でも可能であるが、今回の実験においては排水方式を採用し、移動床部を流下してくる水は清水の条件とした。流量の調整は水路上下流端に設置されているスルース・バルブに、流量測定は三角堰および渦流量計によった。図 2-1 に実験水路の概要を示す。⁷⁾

2.2.2 実験方法およびその手順

限界掃流力を求める実験においては、底泥の量が限られているために、移動床区間の一部に底泥を敷き詰めた。底泥を敷き詰めるのに二種類の方法を採用した。一つは、移動床区間の中央部の 3分の 1 を移動床として、その部分にぴったり収まる試料箱を用意し、試料箱に所定の含水比の底泥を充填し（厚さ 1.5cm）、その試料箱を水路から出し入れする方法である。試料を水路に入れる際には蓋をして、底泥と水が接触する際に起きやすい両者の接触角の違いによる底泥のはがれを防いだ。この方法によれば、水路中に水があっても試料の出し入れが可能であるので、実験準備が迅速化される。しかし、試料箱が長すぎると試料箱の出し入れの際に底泥がこぼれ、底泥表面が固定床と同一高さにならない。他の一つは、移動床幅を縮めて長さ 90cm×幅 5cm×高さ 1.5cm とし、水路中の水を全て排除した後で所定の含水比の底泥を直接移動床に敷き詰め、固定床面と同一高さに仕上げる。その後、微小流量で移動床面を冠水させる方法である。水が移動床を覆う際、表面張力による底泥層のはがれが生じないように十分に注意した。はがれが生じた場合は、こてで表面を整地したが、はがれの程度によっては試料を敷き詰め直した。この方法は移動床部を長くできる利点があるが、次の実験の通水までにかかなりの時間を要することが欠点である。

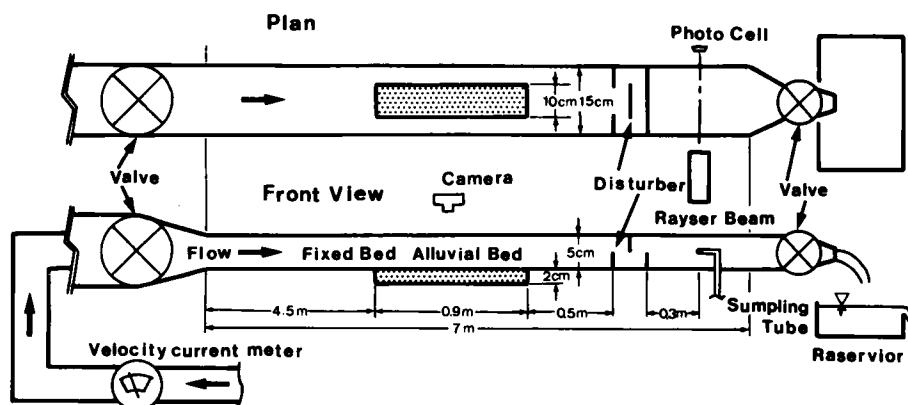


図 2-1 流送実験用長方形断面管水路

予備実験として、バルブの開度と流量・ピエゾ水頭の関係を固定床実験において求めた。本実験では決められた速度で、流量、即ちせん断応力を増加させたが、その操作はバルブのみで行った。予め測定時間とバルブ回転数の関係を与えておき、それに従ってバルブを操作してその時間の目的の水理条件を実現させた。この場合、渦流量計によって流量を連続的に測定して所定の流量を満足しているかを確認した。

底泥の流送形態の観察や写真撮影は、限界掃流力を求める実験の際に行った。流量を漸次

増加させて、特徴的な流送形態が現れた時、移動床の直上と側面から写真撮影を行い、その時の流量とピエゾ水頭をチェックした。

本実験において、バルブ操作によるせん断応力の増加の割合は $0.025 \text{ (N/m}^2\text{)}/\text{min}$ (平均流速にして $0.01 \sim 0.02 \text{ (m/s)}/\text{min}$) とした。非定常流れによる付加せん断応力 $\Delta \tau$ の影響が懸念されるが、 $\Delta \tau$ の大きさは、管水路の非定常流れの運動方程式において動水勾配が同一平均流速の定常流のそれに等しいとすれば、 $\Delta \tau = \rho R(\partial U_m / \partial t)$ で評価される。ここで R は径深、 U_m は断面平均流速である。 $\Delta \tau \div \rho R(\Delta U_m / \Delta t)$ と近似して $\Delta \tau$ を求めた結果、 $\Delta \tau / \tau$ の値は 10^{-2} のオーダーとなり、非定常流れによる $\Delta \tau$ の影響は無視できると判断した。

実験において、各底泥の含水比は原則として 6 通り変化させた。底泥の量が少ないものはこの限りではない。各含水比条件ごとに 3 回の流送実験を行った。所定の含水比の底泥を移動床に敷いた後直ちに流送実験を行った。図 6-3 の沈降曲線が示すように、底泥の粘度が $\eta_1 > 0.07 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ の条件では、界面が現れるのに 100 分近くを要する。また界面沈降が生じたとしても、沈降初期は等速沈降区間となるため表層近くの濃度は変化しない。今回の含水比条件ならば底泥を移動床に敷きつめた後 2 時間以内であれば、底泥は初期含水比(濃度)のまま存在しており、圧密等による底泥の特性の変化は無視できると考えられる。

流送実験は、水温および泥温とも $20 \pm 5^\circ\text{C}$ の条件で行った。実験を行った含水比の値は底泥の種類によって異なるが、各底泥とも粘度は $0.05 < \eta_1 < 2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (但し、第二底泥グループは $\eta_1 = 20 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ もある) の範囲に、降伏値は $0.05 < \tau_1 < 2 \text{ N/m}^2$ の範囲に収まっており、さらに含水比は液性限界値より高い値であった。

第 2.3 節 限界掃流力の実験

限界掃流力の実験は、表 2-1 に示す底泥について行った。表 2-1 には、実験を行った含水比条件を●印で示す。No.1 から No.18 は、カオリナイトおよびベントナイトに澱粉もしくは寒天を人為的に加えたもので、含有有機物の種類および量が限界掃流力に及ぼす影響を実験的に検討する目的である。⁸⁾ No.20～25 のシリーズは露ヶ浦底泥中の各種有機物を化学的処理により除去した試料であり、底泥成分中の有機物が限界掃流力に与える影響を実験的に検討するのが目的である。底泥は第一の方法(長さ 30cm×幅 10cm×高さ 1.5cm)で移動床部に敷き詰めた。流量を所定の増加率で漸次増加させてゆき、限界時にピエゾ水頭勾配と流量を読み取り、採水も行った。限界の判定には、目視による方法とレーザー濃度計の出力の変化から判定する方法とを併用した。この判定基準には主観的要素はいるが、この段階では砂粒の場合のような確立された判定基準がないためやむを得ないと考えられる。ピエゾ水頭からのせん断応力の換算は $\tau = \rho g R I$ で求め、径深 R としては平坦床の底泥床面は滑面であるとして $R = A_r / S$ (A_r : 断面積, S : 潤辺) を採用した。破壊限界近くで波状河床が形成されたときの R の評価に問題が残るが、今回は特に補正を加えなかった。河床が平坦な場合に適当な流量 Q に対してピエゾ水頭勾配 I を読み、 Q と I の関係を固定床実験の結果と比較したが、ほとんど同じ関係が得られた。 $Re = U_m R / \nu > 2000$ (U_m : 断面平均流速, ν : 水の動粘性係数) に対して、 I は次式で近似された。

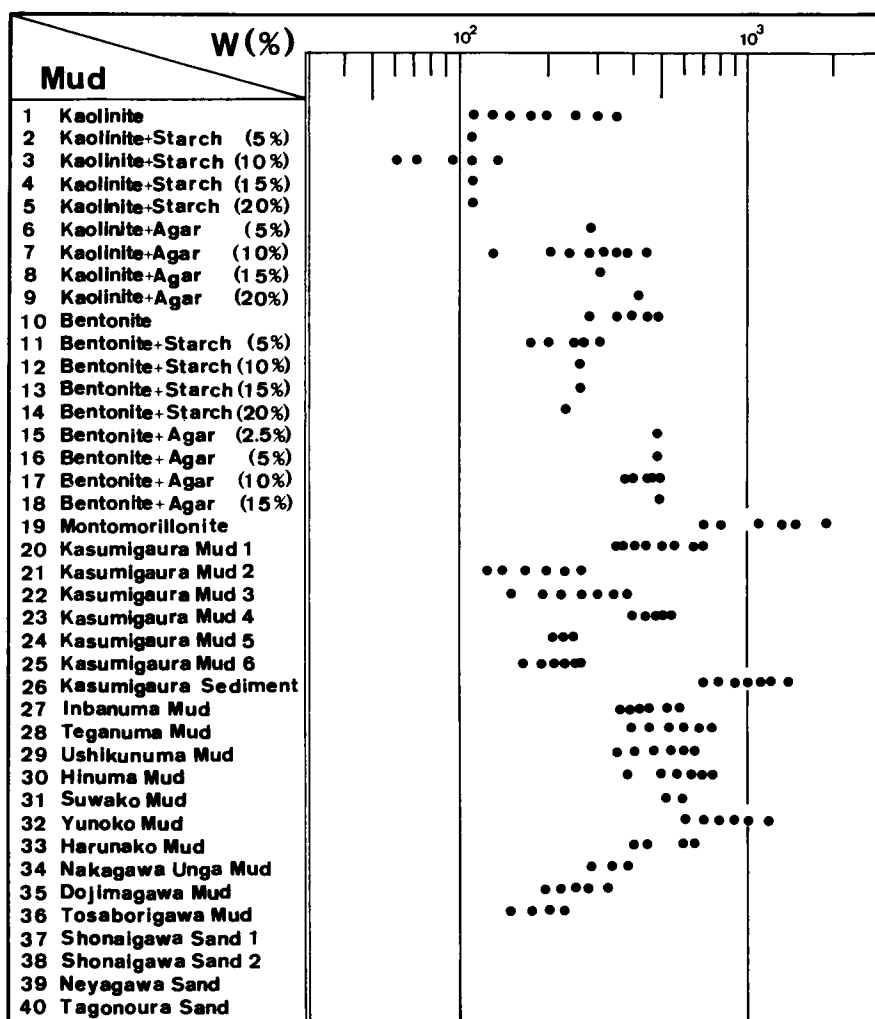
$$I \propto Q^{1.85}$$

$$(Q : \text{l/s})$$

$$(2-1)$$

式 (2-1) の Q にかかる指数の値は、滑面乱流における値 1.75~1.85 にはば合致している。
また、 $\tau = 1\text{N/m}^2$ 、 $d_m = 5\mu\text{m}$ とした場合、 $u_* d_m / \nu = 1.6$ ($u_* = \sqrt{\tau / \rho}$) となり、表面粗度も滑面条件を満足している。

表 2-1 限界掃流力を求めた底泥の種類および含水比条件



第 2.4 節 飛び出し量の実験

飛び出し量を求めた底泥の種類と含水比の条件を表 2-2 に示す。表中の○印の含水比条件

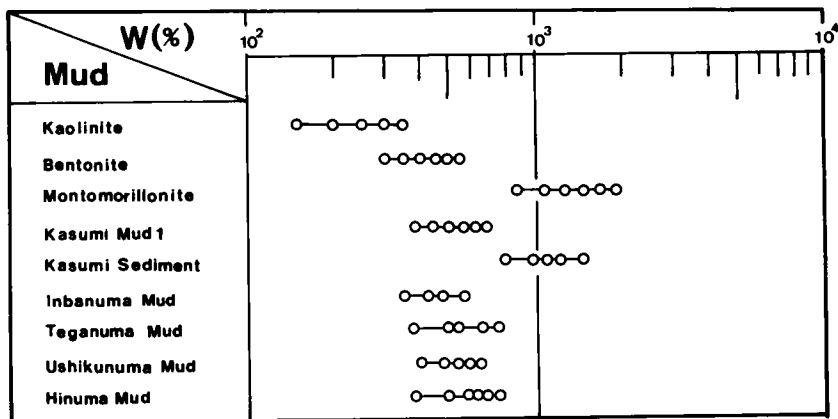
で実験を行った。飛び出し量の実験においては、移動床部は第二の方法（長さ 90cm×幅5cm×高さ 1.5cm）とし、所定の含水比の試料を直接河床に敷き詰めた。流量の増加方法などは、限界掃流力の実験の場合と同様であるが、途中でバルブを停止することはなかった。飛び出し量はレーザー濃度計により計測した。レーザー光線の方向は水路横断方向で水平とした。濃度計の出力と濃度の関係は予め求めておき、実験中に採水を行ってその関係をチェックした。水路を流下した水は系外へ排水して、移動床を流下する水は常に清水の条件とした。飛び出した底泥は移動床部に沈降・停止することがないため、濃度計の出力の低下は移動床部での底泥の飛び出し量に対応している。

流量を漸次増加させる測定法を用いたため、30秒間もしくは60秒間の平均濃度と平均断面せん断応力との関係を解析した。飛び出し量 P_m ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)は

$$P_m = (A_r U_m C)/B \quad (2-2)$$

で与えられる。ここで A_r は水路断面積、 U_m は断面平均流速、 C は断面平均重量濃度および B は移動床部面積である。実験は各底泥に対して、原則として 6通りの含水比条件で 3回ずつ行った。底泥を敷き詰めた後直ちに実験を開始した。そのため実験結果の解析の際には圧密等の影響は無視した。

表 2-2 飛び出し量を求めた底泥の種類および含水比条件



第 2.5 節 底泥の概観

ここで、この研究の対象とした底泥や粘土がどのようなものを、成分構成やレオロジーの立場から位置づけておくことにする。⁹⁾

底泥成分の構成は複雑であるが、概要をとりまとめると、土壌成分¹⁰⁾とほぼ同様で表 2-3 のようになる。土壌成分と異なるのは気相の有無である。底泥の場合、時にはメタンガスのような発酵ガスが存在することもあるが、ほとんどの場合気相が無視でき、固相とその間隙をみたす液相が主要成分である。

底泥の固相の無機成分の主体は粘土鉱物であり、これは造岩鉱物が物理的・化学的風化（加水分解・酸化作用・水和作用）および生物的作用を受けた結果新しく生じた鉱物で、一般に造岩鉱物より微小である。どちらの鉱物も大部分はケイ酸塩である。交換性塩基は、主に粘土や有機物にイオンとして吸着されているもので、含有率は少ないが底泥の物理的・化学的性質に及ぼす影響が大きい。有機物は低分子の水溶性化合物から高分子の水溶性化合物まであり、底泥の粘着力の主要因の一つとなっている。

図 2-2 は、土のレオロジー的挙動を主成分となる構造単位の粒子径と含水比で模式的に

表 2-3 底泥成分の概要

| | | |
|--------|-----------|---|
| I 固 相 | i 無 機 物 | a 一次（造岩鉱物）、岩石破碎物 b 二次（粘土鉱物） c 交換性（吸収態、置換性）塩基 d 水溶性塩基（硫酸塩、塩化物、炭酸塩など） e 遊離酸化物 f リン酸塩、その他 |
| | ii 有 機 物 | 水溶性の低級化合物より高分子化合物にいたる |
| | iii 生 物 物 | 微生物、下等動物、水生小動物 |
| II 液 相 | | |

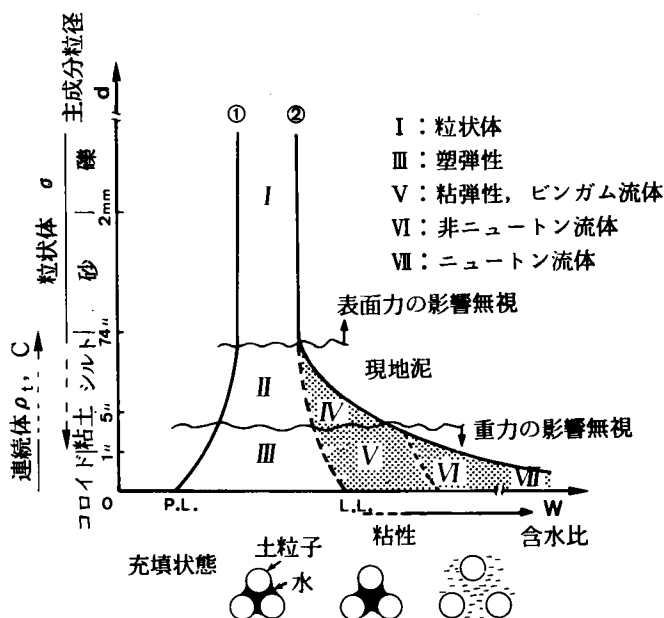


図 2-2 底泥のレオロジー的挙動の分類

領域区分したものである。縦軸に粒子径を、横軸に含水比をとり、気相がない場合、即ち飽和状態について検討したものである。二本の太い実線①および②で囲まれた範囲が飽和状態である。実線①は、構造単位が破壊されることなく実現可能な含水比の下限を示し、実線②は静止状態で存在しうる含水比の上限を示す。また、粒子径が $74\mu\text{m}$ 以上になると表面力の影響が無視でき、逆に $2\sim3\mu\text{m}$ 以下では重力の影響が無視できる。Iの状態は粒状体と考えられるが、この領域の含水比に幅が存在するのは、粒子形状および充填型式の違いによるためである。液性限界(L.L)と塑性限界(P.L)の間の含水比状態 II, IIIは大きな圧密荷重や遠心分離作用などにより実現される。液性限界付近では、粒子相互は不連続となっているが、水膜を隔てて安定な系として存在している。含水比が増加するにつれてペースト状から懸濁体へと移行してゆく。それにつれて、ビンガム流体的性質から非ニュートン流体的性質を経て、粘性流体的性質へと変化する。現地で採取した底泥はほとんど IVの領域に入る。粘土は V, VIおよびVIIの領域に入る。非膨潤粘土は Vの領域のみに入り、膨潤粘土は VIおよびVIIの領域でも存在しうる。IVおよびVの領域の底泥には降伏値が存在し、塑性的・粘弾性的およびビンガムの挙動を示す。今回の流送特性の研究の対象とした底泥および粘土は、ほとんどIV, Vの領域に分類されたが、一部の粘土は VIおよびVIIの領域に分類された。

第 2.6 節 流送実験に用いた底泥の基本的物性

底泥はその生成過程の性質上、複雑な物理化学的性質を有し、それが底泥の浮上・流送の現象に及ぼす影響はかなり大きいと考えられる。そのため、流送実験に用いた底泥試料を対象にその基本的物性を検討した。¹¹⁾ 含水比に関与しない土の状態量として、比重、粒度、コンシステンシー指数および灼熱減量比を選んだ。これらの基本物性項目は、底泥の限界掃流力や飛び出し率と直接に関係付けられることはないにしても、何等かの相関や定性的な傾向を示すと考えられ、また底泥の分類にも必要となる。試験を行った底泥および粘土の種類と各種物性、すなわち、平均粒径 d_m 、中央粒径 d_{50} 、粒度分布の標準偏差 σ_d 、比重 G_s 、灼熱減量比 u.s.s.、塑性限界 w_p 、液性限界 w_L および塑性指数 I_p を表 2-4 に示す。底泥のような飽和状態にあるものでは、含水比、間隙比、単位体積重量および比重の間には次の関係が成立するため、間隙比と単位体積重量は測定しなかった。

$$e = (wG_s)/100 \quad (2-3)$$

$$\rho_t = \{\rho G_s(100+w)\}/(100+G_s w) \quad (2-4)$$

ここで、 e は間隙比、 w は含水比(%), G_s は土粒子の比重、 ρ_t は土粒子の単位体積重量、 ρ は水の単位体積重量(密度)である。

2.6.1 底泥および粘土の種類

基本的物性項目を測定した底泥および粘土の種類は、限界掃流力を求めたものと同一であ

表 2-4 基本的物性を測定した底泥および粘土の種類と各物性値

| Bed materials | $d_m (\mu m)$ | $d_{50} (\mu m)$ | $\sigma_d (\mu m)$ | σ/ρ | VSS(%) | Wp(%) | WL (%) | p (%) |
|---------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|--------|-------|--------|-------|
| 1 Kaolin | 6.5 (4.2) | 5.5 (2.0) | 4.7 (3.8) | 2.60 | 2.3 | 38.54 | 51.05 | 12.54 |
| 2 Kaolin+Starch (5%) | | | | | | 34.23 | 46.70 | 12.47 |
| 3 Kaolin+Starch (10%) | 7.1 (4.41) | 5.0 (2.5) | 6.4 (3.61) | 2.48 | | 27.87 | 42.28 | 14.41 |
| 4 Kaolin+Starch (15%) | | | | | | 22.68 | 42.54 | 19.86 |
| 5 Kaolin+Starch (20%) | (4.10) | (2.0) | (3.7) | | | 16.58 | 45.04 | 28.46 |
| 6 Kaolin+Agar (5%) | | | | | | 33.90 | 155.40 | 121.5 |
| 7 Kaolin+Agar (10%) | (41.0)* | (22.0) | (47.0)* | 2.48 | | 49.80 | 225.0 | 175.2 |
| 8 Kaolin+Agar (15%) | | | | | | 57.70 | 246.9 | 189.2 |
| 9 Kaolin+Agar (20%) | | | | | | 49.30 | 329.8 | 280.5 |
| 10 Bentonite | 14.41 (14.4) | 10.0 (5.0) | 16.8 (16.3) | 2.60 | 1.63 | 32.95 | 186.5 | 153.5 |
| 11 Bentonite+Starch (5%) | (13.2) | (4.0) | (16.3) | | | 24.80 | 167.5 | 142.7 |
| 12 Bentonite+Starch (10%) | 16.50 (13.60) | 11.0 (8.0) | 16.3 (17.12) | 2.48 | | 21.74 | 162.5 | 140.8 |
| 13 Bentonite+Starch (15%) | (13.0) | (3.0) | (17.4) | | | 22.17 | 164.8 | 142.3 |
| 14 Bentonite+Starch (20%) | (13.3) | (2.5) | (17.5) | | | 20.73 | 151.2 | 130.5 |
| 15 Bentonite+Agar (2.5%) | | | | | | 29.30 | 242.9 | 213.6 |
| 16 Bentonite+Agar (5%) | | | | | | 29.40 | 276.6 | 247.2 |
| 17 Bentonite+Agar (10%) | (40.0)* | (27.5) | (45.0)* | 2.48 | | 34.70 | 250.3 | 215.6 |
| 18 Bentonite+Agar (15%) | | | | | | 39.30 | 316.7 | 277.4 |
| 19 Montmorillonite | 2.1 | 0.8 | 2.2 | 2.60 | 0.64 | 45.3 | 354.0 | 308.7 |
| 20 Kasumi Mud 1 | 20.7 | 11.0 | 21.3 | 2.42 | 17.12 | 70.70 | 212.5 | 141.8 |
| 21 Kasumi Mud 2 | (14.6) | (5.5) | (15.1) | 2.59 | 12.10 | 44.50 | 95.9 | 51.4 |
| 22 Kasumi Mud 3 | (9.5) | (2.5) | (15.4) | | | 31.30 | 97.1 | 65.3 |
| 23 Kasumi Mud 4 | (38.9)* | (25.0) | (27.5)* | | | 48.40 | 272.2 | 223.6 |
| 24 Kasumi Mud 5 | (36.1) | (25.0) | (30.5) | 2.51 | 16.01 | 55.50 | 112.9 | 57.4 |
| 25 Kasumi Mud 6 | 27.2 | 17.5 | 21.3 | 2.61 | 11.48 | 44.20 | 102.8 | 58.6 |
| 26 Kasumi Sediment | 27.7 | 24.9 | 18.8 | 2.28 | 19.00 | 77.7 | 324.9 | 247.2 |
| 27 Inbanuma Mud | 15.4 | 9.5 | 14.5 | 2.51 | 10.64 | 69.0 | 206.0 | 137.0 |
| 28 Teganuma Mud | 26.6 | 17.5 | 22.5 | 2.39 | 14.23 | 82.7 | 253.1 | 170.4 |
| 29 Ushikunuma Mud | 17.3 | 11.5 | 13.1 | 2.36 | 16.41 | 84.0 | 208.8 | 124.8 |
| 30 Hinuma Mud | 11.8 | 7.5 | 11.3 | 2.52 | 12.71 | 64.9 | 239.6 | 174.7 |
| 31 Suwako Mud | 11.0 | 7.5 | 14.0 | 2.35 | 14.26 | 81.4 | 232.1 | 150.6 |
| 32 Yunoko Mud | 16.5 | 4.0 | 30.1 | 2.08 | 13.69 | 96.4 | 250.6 | 154.2 |
| 33 Harunako Mud | 34.5 | 25.0 | 28.3 | 2.35 | 15.11 | 81.4 | 150.7 | 69.0 |
| 34 Nakagawa Mud | 47.8 | 15.0 | 119.6 | 2.93 | 11.42 | 39.3 | 119.6 | 80.3 |
| 35 Dojimagawa Mud | 60.6 | 40.0 | 59.2 | 2.63 | 7.66 | 33.9 | 59.2 | 25.3 |
| 36 Tosaborigawa Mud | 47.6 | 30.0 | 68.7 | 2.55 | 6.89 | 46.2 | 68.7 | 22.5 |
| 37 Shonagawa Sand 1 | 169.0 | 150 | 33.31 | 2.75 | 1.03 | — | — | — |
| 38 Shonagawa Sand 2 | 524.0 | 400 | 344.1 | 2.73 | 0.81 | — | — | — |
| 39 Neyagawa Sand | 666.0 | 540 | 644 | 2.05 | 1.95 | — | — | — |
| 40 Tagonoura Sand | 195.0 | 100 | 236.06 | 2.95 | 2.87 | — | — | — |

る。人為的に有機物を混入した理由は、有機物の種類や量もしくは粘土鉱物の種類が、底泥および粘土の物性に及ぼす影響を検討するためである。カオリナイトとベントナイトに混入させた有機物は可溶性澱粉と寒天である。両有機物は分子量の大きい長鎖状の高分子体構造で、非電解質ではあるが OH 基を多数含むため極性を持つ。そのため有機複合体を生成する機構としては、イオン交換反応はほとんどなく、極性吸着や粘土粒子が有機物の高分子構造の中に物理的に取り込まれる機構が考えられるが、両機構のどちらが主要なものであるかは定説がない。両有機物を選んだ理由として、両有機物が活性汚泥や底泥中に存在すること、粘土鉱物の陽イオン交換容量や荷電状態によらず含有率を決められること、含有させる手順が簡単なことなどが挙げられる。表 2-4 中の(%)は(有機物)/(粘土+有機物)で定義した有機物の重量含有率である。有機物を含有させる手順は、所定量の水に有機物を混入し加熱溶解した後、粘土を加えて練り上げ、自然冷却させるというものである。寒天含有粘土は冷えると一つの大きな塊となるので、乳鉢で潰した後、0.1mm のふるいで裏ごしした。

現地泥は、No.26 の露ヶ浦沈降物を除いて、すべて現地においてエックマン・バージ採泥器を用いて採取したものである。採泥厚は、泥表面から10~15cm程度である。湖沼泥はほぼ湖心で採取し、河口部泥は橋梁上で採取した。Kasumi Mud 1は露ヶ浦西浦高浜入で採取したものである。Kasumi Mud 2は Kasumi Mud 1を濃度30%の過酸化水素水で加熱処理したものである。Kasumi Mud 3およびKasumi Mud 4はKasumi Mud 2にそれぞれ澱粉および寒天を 10%混入したものである。またKasumi Mud 5はベンゼン・メタノール処理によりKasumi Mud 1から脂質を抜いたもの、さらにKasumi Mud 6は濃度 1規定の水酸化ナトリウムで加熱処理を行ってKasumi Mud 1から腐植を一部除去した後に、塩酸を加えて PHを約7に調整したものである。一方、露ヶ浦沈降物は露ヶ浦高浜入で採取した沈降物質である。¹²⁾ No.34~40の河口部泥の採取地点は以下の通りである。No.34 は名古屋市中川運河東海橋、No.35 は大阪市堂島川船津橋、No.36 は大阪市土佐堀川瑞穂橋、No.37 は名古屋市庄内川正徳橋、No.38 は名古屋市庄内川枇杷島橋、No.39 は大阪市寝屋川放出橋、No.40 は田子ノ浦瀬井川河口である。

2.6.2 粒度分布

粒度分布の測定には光透過法粒度測定装置を用いた。光透過法は液相沈降法の一つで、懸濁液に側面から光をあてて透過する光の量から粒子濃度を求める方法である。¹³⁾ 本方法と遠心沈降法を併用することにより測定時間を大幅に短縮できる。表 2-4 の d_m 、 d_{50} および σ_d の各値は重量分布から求めた値であり、() 内の値はアンドレアセン・ピペットによる測定結果である。この方法も液相重力沈降法の一つで、数10 μm 以下の微粉体の粒度測定装置として JIS規格に取り入れられている。両方法とも、水を溶媒として用いた場合、信頼のにおける粒度測定範囲は 50 μm 以下といわれている。測定にあたって、試料の分散は湿潤状態のままプロベラ攪拌のみとした。表 2-4 中の*印の付いた寒天含有粘土の d_m と σ_d の値は50~100 μm の間の分布を一樣と仮定して求めたものである。

澱粉および寒天含有の影響としては、カオリナイト、ベントナイト、露ヶ浦底泥とも、澱粉含有による粒度の変化はあまり認められない。寒天含有によっては d_m 、 d_{50} および σ_d ともかなり大きくなる。光学顕微鏡写真でも、澱粉含有によっては土粒子の結合が進んでいないこと、一方寒天含有によっては多くの土粒子が寒天塊の内に取り込まれて粒塊が形成され

ていることが確認された。¹⁴⁾ この粒塊は、写真で判定する限りでは Kasumi Mud 1 の粒塊と類似したものであった。湖沼泥の粒度構成は No. 33 の棒名湖泥を除いて $10\mu\text{m} < d_m < 30\mu\text{m}$ および $d_{50} < d_m \div \sigma_d$ なる特徴がある。

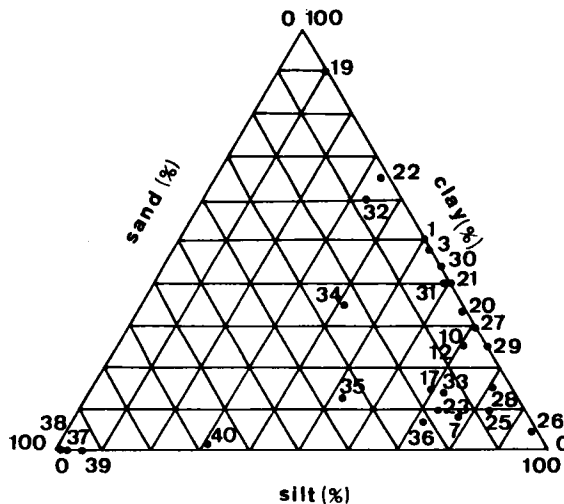


図 2-3 底泥および粘土の三角表示法による粒径区分

表 2-4 の粒度の結果は完全分散状態のものではないが、粒径区分を三角表示法により示すと図 2-3 となる。図中の番号は表 2-4 に付けた試料の番号に対応する。番号の位置がその試料の粒径区分を示す。寒天含有粘土を除いたほとんどの粘土や湖沼泥が、右側斜辺近傍に位置し砂分 ($> 74\mu\text{m}$) が数%以下であることを示している。寒天含有土, Kasumi Mud 5, 棒名湖泥で、砂分が 15%前後となっている。Kasumi Mud 5 はその処理過程で気乾状態を経るため、粒度構成が Kasumi Mud 1 とは異なるものとなったと考えられる。河口部泥のうち、液性限界および塑性限界が測定可能であった No. 34~36 の泥は砂分比が 30%前後で、日本統一土質分類法¹⁵⁾ によると細粒土に分類される。No. 37~40 の河口部底質は砂もしくは砂質土に分類され、液性限界および塑性限界が測定不可能であった。

2.6.3 比重と灼熱減量比

有機物量を示す指標として灼熱減量比を取り上げた。今回求めた灼熱減量比の測定条件は試料を 600°C で 3 時間焼結するというものである。カオリナイト、ベントナイト、モンモリロナイトの灼熱減量比の値は 2% 前後となり、この値が結合水や分解されやすい無機物質分であるとすれば、現地泥の有機物量は表 2-4 の結果より 2% 程少ないと考えられる。湖沼泥はすべて 10% 以上であり 20% 近いものもある。河口部泥では、細粒土に分類されるもので 7~11%、砂および砂質土に分類されるものでは 3% 以下となった。一般に、有機物の吸着は表面反応であるため、同一重量の土ならば粒径の小さいもののほど表面積が大きくなり有機物を吸着しやすいと考えられるが、今回の結果はそれを実証している。

粘着性土の比重の結果は灼熱減量比の大きなものほど小さくなる傾向が認められる。一次鉱物の比重は、石英で 2.65、長石で 2.5~2.8、雲母で 2.8~3.2 であり、純粹粘土の比重は

普通 2.6前後となる。有機物の比重は1.2～1.7程度であるので、有機物量が増加すると土の比重が減少するのはこのためである。

2.6.4 コンシステンシー指数

液性限界と塑性指数は、土の潜在特性を判別する上で有効で、粒度構成よりは土の特性をよく表わすといわれている。液性限界は加水された土のせん断抵抗に関する尺度であり、土粒子の真の粘着力を間接的に反映しており、粒子の接触面積の総和、粒子の細かさや形状、塩分濃度、交換性陽イオンなどに大きく影響される。粒子が扁平になるほど粒子間の接触面積が大きくなり液性限界は高くなる。塑性指数は可塑性の尺度である。粘土の液性限界の大きさはモンモリロナイト > ベントナイト > カオリナイトの順となっている。各粘土の液性限界は、澱粉含有によって大きな変化はないが含有率の増加と共に若干下がる傾向にある。塑性限界も同様である。寒天含有によって、液性限界は 100～280%程度も増大し、その値は寒天含有率の増加と共に増す。一方、塑性限界は含有率に対して若干の増加傾向はあるもののほとんど変化しない。そのため寒天含有粘土の塑性指数は、液性限界の増加と共に 100～280%程度大きくなり可塑性が増大することになる。松尾・嘉門も有機物を調整したヘドロについて同様の結果を得ている。¹⁶⁾ 寒天含有率の増加と共に液性限界が増大するのは、高分子化合物である寒天の立体網目構造に原因があると考えられる。寒天含有率が高いほど網目構造の結合部が増えそれに伴い粘着力が増すため、液性限界が大きくなると考えられる。塑性限界があまり変化しない理由は明確でない。澱粉および寒天含有による霞ヶ浦底泥のコンシステンシーの変化は粘土の場合と同様なものであった。また有機物除去によって、霞ヶ浦底泥の液性限界は 200%程度から 100%程度にまで減少し、塑性限界も 70%から 40～50%程度に

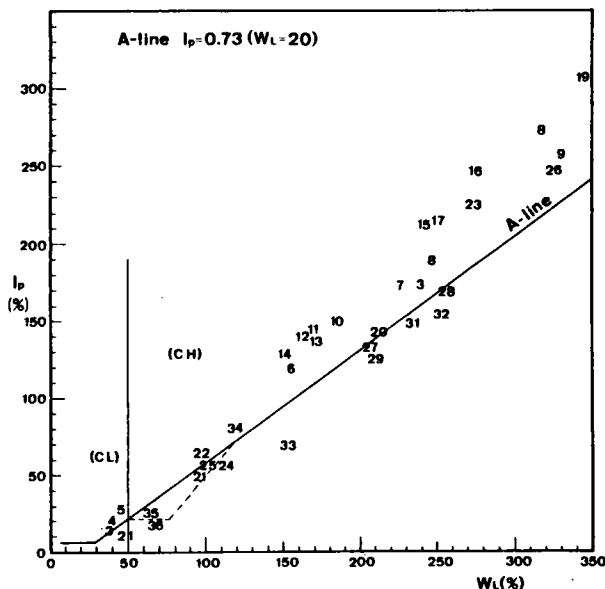


図 2-4 底泥および粘土の塑性図

まで減少した。その結果、塑性指数は 140%から 60%程度にまで減少し、粘着力および可塑性とも低下することになる。湖沼泥の場合、棒名湖泥を除いて液性限界は200%以上であり、塑性指数も120~170%程度と高かった。

図 2-4 は底泥および粘土の塑性図である。すべての土が、

$$I_p = 0.73(w_L - 20) \quad (I_p: \text{塑性指数}, w_L: \text{液性限界}) \quad (2-5)$$

で定義される A-lineの近傍もしくは上側に位置する。このことは、液性限界が高いものほど可塑性も大きいことを意味する。現地泥は A-lineより下側近傍に集中し、澱粉含有粘土はもとの粘土とほぼ同じ位置にある。寒天含有土は A-lineより少し上側に位置し、通常の有機質土が A-lineの下側に位置するのと少し異なる。

液性限界、塑性指数は灼熱減量比とは正の、比重とは負の高い相関を示す。このことから底泥中の有機物が底泥の粘着性に深く関与していることが推察される。

第 2.7 節 結 論

本章では、底泥などの粘着性土の浮上・流送現象の解明を困難にしている理由について触れ、それが微細な土粒子間に作用する粘着力であることを示した。そして粘着性土の浮上・流送に関する既往の研究について概説し、粘着力の評価が困難なため、流送現象の基本量である限界掃流力や飛び出し率を実験的にも理論的にも定式化できた研究がほとんどないことを述べた。

次に、粘着性土の浮上・流送問題に対する流送実験の必要性や目的を述べ、限界掃流力や飛び出し量を求める実験に用いた装置、実験方法および手順について述べた。さらに流送実験で底泥として用いた試料の種類と含水比条件を示し、その試料を用いた理由についてふれた。最後に、実験に用いた粘着性土を分類したり流送特性との関連性を検討するために、試料土の物理化学的性質について言及した。本章では含水比の影響を受けない物性値として、粒度分布、比重、灼熱減量比およびコンシステンシー指数を測定しその特徴を考察した。

底泥は、ほとんどが細粒土に分類される粒度を持ち、中央粒径 < 平均粒径 ≒ 標準偏差という特性を示す。重量分布から求めた湖沼泥の平均粒径はおおむね10~30 μmの値を示した。また粘土に澱粉を混入させても粒度はほとんど変化しないが、寒天を混入させると平均粒径は約 40 μmとかなり大きくなる。湖沼泥の比重は2.1~2.5程度、灼熱減量比は 10~20%程度であり、両者の関係には灼熱減量比が高いものほど比重は小さくなる傾向があった。これは粘土鉱物の比重が 2.6~3.0であるのに対し、有機物の比重が 1.2~1.7であるためと考えられる。河口部泥の灼熱減量比は 7~11%となり、砂質土のそれは 3%以下となった。コンシステンシー指数に関する結果は以下の通りである。有機物を含まない粘土では、液性限界の大きさはモンモリロナイト > ペントナイト > カオリナイトの順となる。澱粉含有によって液性限界も塑性指数も若干低下する。寒天含有によって液性限界も塑性指数も 100~280%程度も大きくなり、その値は寒天含有率が大きなものほど大きい。露ヶ浦底泥を用いて有機物除

去の影響を検討した結果、有機物除去によって液性限界も塑性指数も大幅に減少し、粘着力および可塑性が低下した。湖沼泥の場合、液性限界はほとんど200%以上であり、塑性指数も120~170%と高い。対象としたすべての底泥が、 $I_p = 0.73(w_L - 20)$ で定義されるA-line近傍に存在した。液性限界および塑性指数は、灼熱減量比とは正の高い相関が、比重とは負の高い相関が認められた。

参考文献

- 1) Winterkorn, H.F. (1972): Mechanism of water attack on dry cohesive systems, Soil Science, 54, 259-273.
- 2) Task Committee (1968): Erosion of cohesive sediments, Proc. A.S.C.E., 94, HY4, 1017-1049.
- 3) Einstein, H.A. & R.B. Krone (1961): Estuarial sediment transport patterns, Proc. A.S.C.E., 87, HY2, 51-59.
- 4) Sheng, Y.P. & W. Lick (1979): The transport and resuspension of sediments in a shallow lake, Jour. of Geophys. Res., 84, (C4), 1809-1826.
- 5) Migniot, P.C. (1968): Étude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques, Houille Blanche, 23, (7), 591-626.
- 6) 大坪国順(1983): 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究, 国立公害研究所研究報告, 第42号, 105-112.
- 7) 大坪国順(1983): 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究, 国立公害研究所研究報告, 第42号, 113-123.
- 8) 大坪国順・村岡浩爾・高野恒雄(1980): 粘性土の限界掃流力について, 第16回衛生工学研究討論会講演論文集, 140-146.
- 9) 大坪国順(1983): 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究, 国立公害研究所研究報告, 第42号, 11-20.
- 10) 川口桂三郎・熊田恭一・青峯重範・古坂澄右・岡島秀夫・佐々木清一・高井康男・山根一郎・船引真吾(1974): 改訂新版 土壌学, 朝倉書店.
- 11) 大坪国順(1983): 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究, 国立公害研究所研究報告, 第42号, 21-28.
- 12) 大坪国順・相崎守弘・福島武彦(1981): 底泥の限界掃流力と巻き上げ量について, 国立公害研究所調査報告, 第16号, 65-77.
- 13) 粉体工学研究会編(1975): 粒度測定技術, 日刊工業新聞社.
- 14) 村岡浩爾・大坪国順(1980): 底泥の限界掃流力に関する実験的研究, 国立公害研究所研究報告, 第14号, 33-55.
- 15) 土木学会編(1974): 新版 土木工学ハンドブック 上巻, 技報堂, 259.
- 16) 松尾新一郎・嘉門雅史(1973): 物理化学的見地からのいわゆるヘドロの工学的性質について, 土木学会論文報告集, 第209号, 103-113.

第3章 底泥の限界掃流力

第3.1節 概 説

底泥の浮上量を推定する目的の第一歩として、底泥の限界掃流力の定式化を試みた。砂粒における限界掃流力公式に対応するものを、底泥に対しても確立することが目的である。

粘着性土に関する限界掃流力の研究は数多くなされてきたが、含水比の影響評価が欠如していたり、低含水比に対するものが大部分であった。近年、底泥に関する限界掃流力の研究も始まり、限界掃流力に及ぼす含水比や見掛け粘度の影響などが論じられるようになったが、底泥全般にわたって限界掃流力を規定できるまでには至っていない。¹⁾

底泥の浮上・流送特性に関する研究では、限界掃流力および飛び出し率とも実験的研究が先行する。それは底泥の流送抵抗力の評価が非常に難しいことと、現象自体がまだよく明らかにされていないためである。本研究においても底泥の浮上・流送の現象を実験的に把握することから始めた。流送実験時の観察に基づいて底泥の浮上・流送に対して、流送限界と破壊限界という二つの限界状態を定義し、さらに流送形態の特徴から底泥を二つのグループに分類した。そして流送限界および破壊限界と底泥の諸物性との関係を検討し、限界掃流力を規定する物性項目の解明と、その物性項目と限界掃流力の関係を求めた。

その結果、流送形態によって二つに分類された底泥グループは、沈降特性および流動特性（ずり速度とずり応力の関係を示す流動曲線の特性）においても異なった特徴を示すことが明らかとなった。さらに流送限界と破壊限界という二つの限界掃流力は底泥の粘度との間に一義的な関係が認められ、その関係式が二つの底泥グループの間で明確に区別されることが明らかとなった。

第3.2節 実験結果

3.2.1 流送限界と破壊限界

底泥の流送実験の結果から、底泥の流送に関しては二つの限界掃流力の定義を提案する。²⁾ 一つは流送限界 (the limit of mud particle's movement) τ_{c1} であり、もう一つは破壊限界 (the limit of mud bed destruction) τ_{c2} である。前者は、底泥粒子が浮上し始める限界であり、現象的には砂粒の限界掃流力に対応するものである。後者は、底泥床面が破壊して大量の底泥が短時間に流送されてしまう限界である。従来の研究者が求めた限界掃流力の大部分は、ここで定義した流送限界に対応するものである。例外として、細井ら³⁾ の求めた限界掃流力は破壊限界に対応するものであろう。また、馬場ら⁴⁾ も二つの限界を定義しているが、その定義が明確でないので今回定義した二つの限界との対応関係は不明である。ただ馬場らの定義による第二限界掃流力は今回定義した破壊限界とは異なるものと考えられる。

流送限界以上の掃流力で底泥粒子は飛び出すが、せん断応力が破壊限界値近くになるまでは大した河床低下はない。

3.2.2 浮上粒子の大きさ

底泥が浮上する際の粒子径についてふれる。実験を通した全般的な傾向としては、せん断応力が破壊限界以下の浮上現象では、粒子径は特に目立った凝集体もなく、表 2-4 に示した各底泥の粒度特性と大差なかった。一例として、霞ヶ浦沈降物において、浮上した底泥粒子の平均粒径は表 2-4 に示した平均粒径 ($27.2\mu\text{m}$) の 1.2~2 倍程度であった。一方、破壊時や亀裂部から浮上する場合の粒子はかなり広い粒度分布を持ち、粒径が 2~3mm の粒子も数多く観察された。また湖沼泥の場合、清面状の泥表面がはがれる際の粒子の大きさは厚さ 0.5mm 程度、面積 1~数mm の片鱗状のものが多く、泥表面があばた状になった後は微細粒径から $100\mu\text{m}$ 前後のものまで幅広く存在していた。

3.2.3 底泥の種類の影響

各底泥に対する流送限界および破壊限界と含水比の関係を図 3-1、図 3-2 に示す。同一含水比条件でも、底泥によって流送限界および破壊限界の値が異なることがわかる。湖沼泥は河口部泥に比して、流送限界および破壊限界ともかなり大きくなっている。この理由としては、湖沼泥のほうが粒度が小さく有機物が多いために粘着力が大きいことが考えられる。ベントナイト主成分粘土を除いた全般的な傾向として、同一含水比において粘度 η_1 (詳しい説明は第 5 章を参照のこと) が高い底泥ほど、流送限界および破壊限界の両限界値も大きい。カオリナイトおよびベントナイトとも、同一含水比条件での流送限界および破壊限界の値は、澱粉含有により低下し、寒天含有により増加している。なお、試料番号 No.37~40 の試料については、すべて砂粒の限界掃流力公式が適用されることを確認した。⁵⁾

3.2.4 含水比の影響

図 3-1 および図 3-2 の結果から、No.37~40 の試料を除くすべての底泥において、その流送限界および破壊限界の値は、含水比の増加と共に低下することがわかる。これが、含水比が高く飽和状態にある底泥の限界掃流力の特徴である。不飽和土の場合は、必ずしもそうはならないことが Winterkorn⁶⁾ や Grissinger⁷⁾ によって報告されている。土粒子間の水分は含水比が非常に低い時には粒子間の接着剤として働くのに対し、含水比の高い場合は潤滑剤として作用するため、このような違いが現れる。含水比の増加に伴う両限界値の減少の度合は、河口部泥が最も大きく、次に湖沼泥、粘土の順になっている。破壊限界値と流送限界値の差は含水比の増加と共に小さくなる。

3.2.5 含有有機物の影響

底泥中の有機物は底泥の粘着力の主要因の一つである。有機物の種類や量が底泥の限界掃流力に及ぼす影響を定量的に評価することは難しいとしても、定性的な傾向を知るだけでも粘着性粒子の限界掃流力の基本的特性を理解する上で大いに役立つと思われる。この点に鑑み、底泥中の各種有機物を除去したり、粘土鉱物に澱粉等の有機物を人為的に含有させるこ

とによって、含有有機物が底泥の限界掃流力に及ぼす影響を実験的に検討した。図 3-3および図 3-4は、化学的処理によって霞ヶ浦底泥中の有機物を減少させた試料に対して、流送および破壊限界と含水比の関係求めたものである。過酸化水素水による加熱処理を行った場合、有機物の分解が進んで底泥の粘着性が低下したために、底泥粒子は個々の構造単位で離脱・浮上しやすくなる。そのため流送限界値はかなり減少した。この底泥に寒天を含有させると流送限界は大きくなる。澱粉含有によっては、せん断応力が増加するとともに波状河床

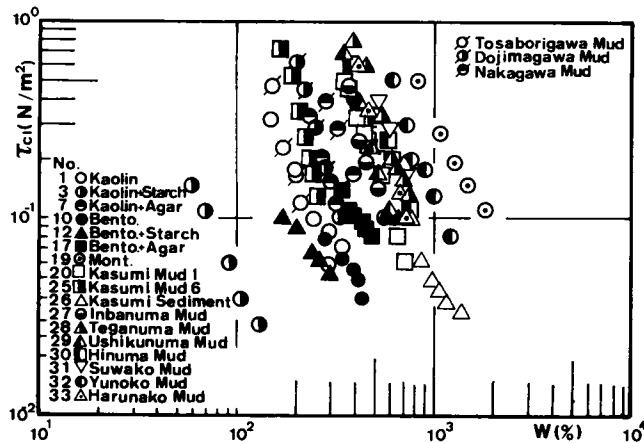


図 3-1 流送限界と含水比の関係

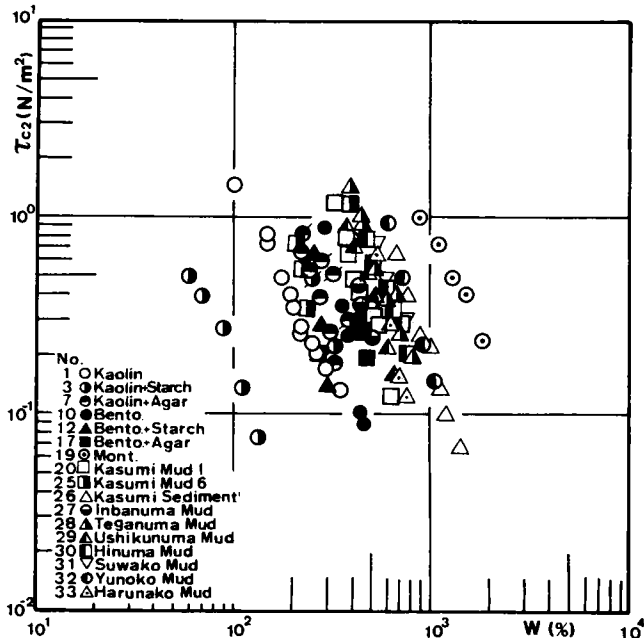


図 3-2 破壊限界と含水比の関係

が形成され、亀裂はなく crestの部分から押し潰されるように破壊した。脂質や腐植の除去によっても流送および破壊限界は河口部泥と同程度にまで減少した。図 3-3および図 3-4の結果より、底泥中の有機物は流送抵抗力に大きく寄与していることが明らかとなった。

図 3-5 および図 3-6 は、カオリナイトとベントナイトを例にとり、澱粉および寒天の含有量が流送限界や破壊限界に及ぼす影響を検討したものである。カオリナイトの場合、流送

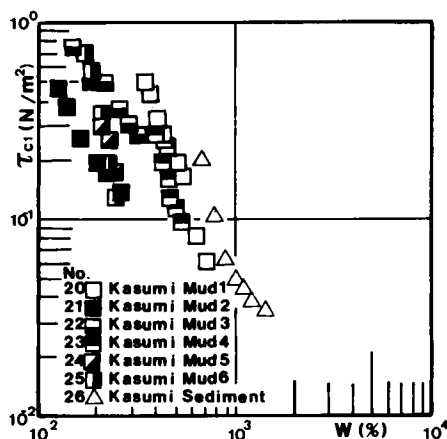


図 3-3 有機物除去処理を施された底泥の流送限界

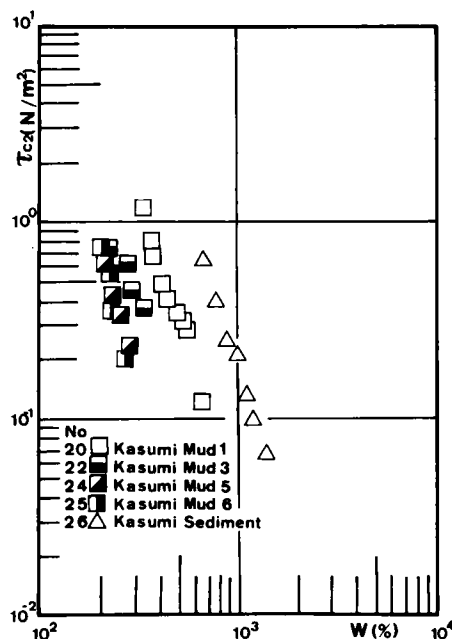


図 3-4 有機物除去処理を施された底泥の破壊限界

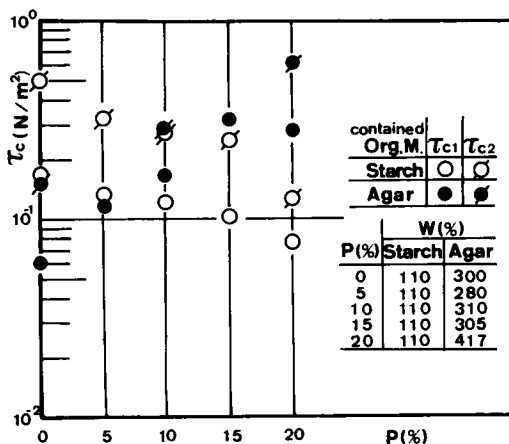


図 3-5 カオリナイトの限界掃流力に及ぼす含有有機物量の影響

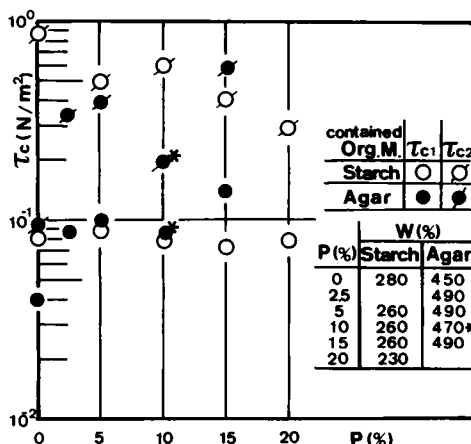


図 3-6 ベントナイトの限界掃流力に及ぼす含有有機物量の影響

限界および破壊限界とも、澱粉の含有率が増加すると低下し、寒天の含有率が増加すると増大する傾向が認められる。ベントナイトの場合も、結果は少しばらついてはいるがカオリナイトの場合と同様な傾向が認められる。

図 3-5 において、含有率 5%および 15%の寒天含有カオリナイトに対して破壊限界が示していないのは、流送実験においてせん断応力が増加しても個々の粒子が激しく浮上し河床が低下するのみで破壊が起こらなかったためである。全般的に寒天含有粘土の結果にバラツキが現れるのは、次の理由によると考えられる。寒天含有粘土の場合、水分は寒天の立体構造に取り込まれるものと、自由水として存在するものがある。二つの形態の水分の比率によって、粘土の性質が著しく変化すると考えられる。また粘土粒子がどの程度均一に寒天の立体構造に混入するかによっても、含有粘土の性質が変化する。これらは最初の寒天溶液の濃度や粘土との練り上げの程度によって異なる。同一含有率の粘土でも同じ状態の粘土を再び作るのは困難であった。寒天のような常温で塊状になる物質は、含有率の影響を検討するのにはあまり適当でないと考えられる。しかし、一応今回の実験では、脆性強度が小さく延性の大きい澱粉の含有率が増加すれば、カオリナイトおよびベントナイトともその流送限界および破壊限界値は低下し、脆性強度が大きい寒天の含有率が増加すれば両粘土とも二つの限界値は増大する傾向が認められた。

第 3.3 節 底泥の流送形態²⁾

3.3.1 流送形態による底泥のグループ区分

底泥は水流によって、ある時は微細粒子が一樣に浮上したり、またある時には河床の一部が破壊していちどきに多量の底泥が粒子塊としてはがれ、下流へ流送される。河床も、平坦河床のまま河床低下する場合もあれば、波状河床を形成し波の谷部にヒビが生じて河床が破壊されたり、山部が押し潰されるようにして破壊することもある。ここでは、底泥が水流により浮上・流送される時に観察される底泥粒子の運動や河床変形などを一まとめにして、底泥の流送形態と呼ぶことにする。

観察の結果、底泥の流送形態は大別して二つのグループに分類できた。その分類は後の第 5 章および第 6 章で述べる流動特性および沈降特性による分類と一致した。河口部泥は、底泥の量の制限から、沈降特性および流動特性の実験ができなかったため、それらとの関連は議論できない。しかし流送形態の特徴から判断すれば、霞ヶ浦底泥を化学的処理した泥と類似の特徴を示し、一応、第一底泥グループに分類される。底泥の流送形態の特徴を模式的に図 3-7 に示す。(a) は第一底泥グループの場合、および (b) は第二底泥グループの場合である。横軸は粘度 η_1 が指標であり、底泥の濃度（含水比）を反映している。縦軸はせん断応力 τ および観察された特徴的な現象であり、原則的にせん断応力の増加に伴って現れた順に記してある。現象が顕著なほど斜線部が広くしてある。 τ_{c1} および τ_{c2} は著者が定義した流送限界および破壊限界である。

3.3.2 第一底泥グループの流送形態の特徴

第一底泥グループの最も特徴的な現象は、水流と底泥層の間の明瞭な界面の存在および破壊する少し前に現れる流れ方向に直角な亀裂である。粘度 η_1 が $0.5 \sim 0.7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 以上では、せん断応力が大きくなると、平坦河床のままで、移動床部上流端近傍や河床の小さな凹凸部に長さ $1 \sim 2 \text{ cm}$ 程度、幅 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 程度、深さ数 mm の亀裂が数本発生し、そこを起点として移動床部全域にわたり破壊した。 η_1 が $0.1 \sim 0.7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ では、移動床部上流端より 20 cm 程度下流部から全域にわたり、波長 $8 \sim 10 \text{ cm}$ 程度、波高数 mm の波状河床が形成された。その後、波状河床のtrough部に長さ数 mm 、幅 1 mm 程度、深さ 2 mm 程度のひびが横断方向に数本発生し、そ

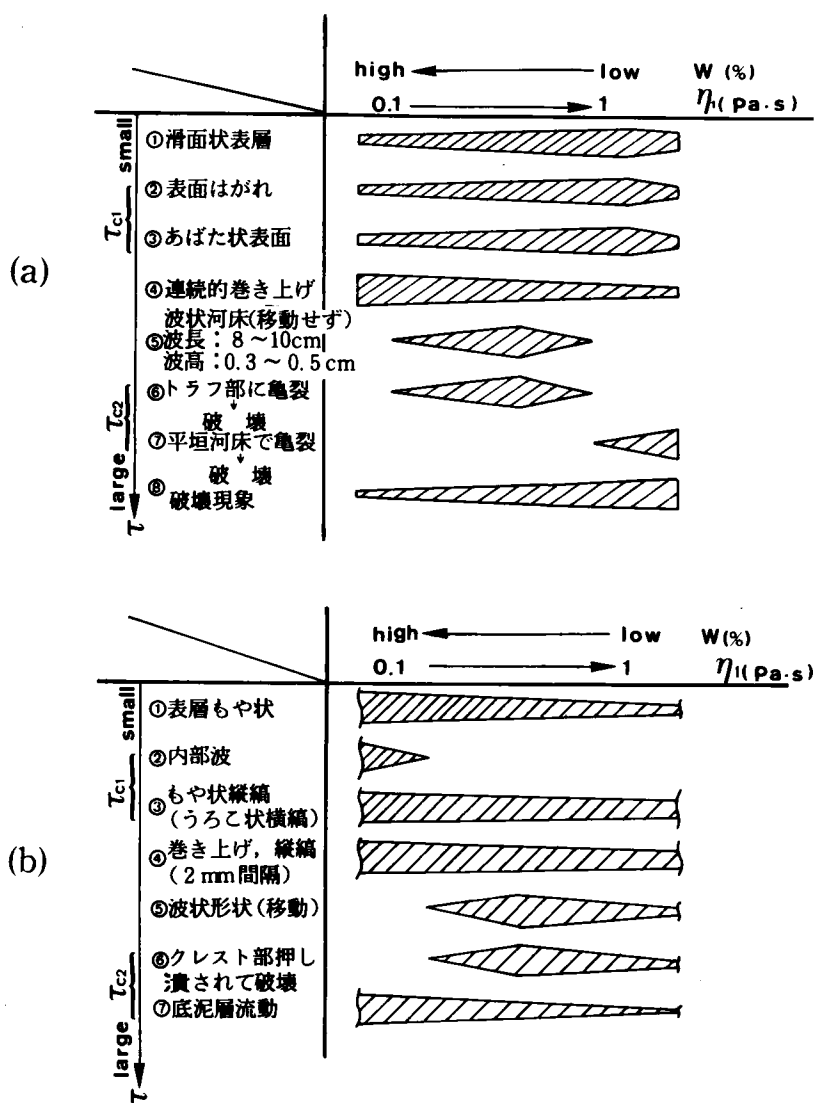


図 3-7 二つの底泥グループにおける流送形態の特徴

の部分から破壊が生じた。 η_1 の低下と共にひび割れは小規模となり、破壊も局部的で弱いものが各所で起こった。 η_1 が $0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以下では波状河床は不明瞭で、激しい底泥粒子の浮上現象と河床破壊との区別がつかなくなった。波状河床は湖沼泥の場合が最も顕著に観察された。しかし、ここで述べたり、次の 3.3.3 で述べる波状河床のスケールは、今回用いた実験水路特有のものかもしれない、この点に関しては異なった水理条件での検討が必要であろう。カオリナイトおよびモンモリロナイトは大きな亀裂や破壊のほうが特徴的で河床はあまり顕著でなかった。また河口部泥や霞ヶ浦底泥を化学的処理した泥は、波状河床が現れても小さく不明瞭で、大きな破壊はなく局部的破壊や激しい粒子の浮上が特徴であった。

波状河床の発生原因は移動床部の上流端効果にあると考えられるが、底泥側の要因としては底泥中の有機物などによる延性効果が考えられる。親水性の有機物などによる何らかの連結作用によって、ある程度の河床変形が許され応力集中に帰因する破壊が抑制されるものと考えられる。一方、今回用いたカオリナイトおよびモンモリロナイトは疎水的なので、脆性強度は大きくても延性効果が小さいために小さな河床歪みが吸収されず、そこから破壊が進行してゆくと考えられる。また河口部泥や化学処理泥は、湖沼泥に比して粘着力が小さいために河床全体としての連結性に乏しく、個々の構造単位として離脱・浮上するので波状河床が形成されにくいものと考えられる。湖沼泥においても、含水比が低くて粘度が高いと波状河床が形成されず破壊する。これは、底泥中の水の存在形態や機能が含水量によって微妙に変化するためと考えられる。また脆性的破壊か延性的破壊かということは応力のかかる速度や変形速度にも依存し、粘度の高い底泥の場合は破壊時のせん断応力や局所流速が大きいため破壊し始めた部分の変形速度が大きくなり、脆性的破壊形態になりやすいということも考えられる。

3.3.3 第二底泥グループの流送形態の特徴

第二底泥グループの流送形態の主な特徴は、底泥表層と水との境界面が不鮮明で、もや状の層があること、いかなる場合も河床に亀裂やひびが生じなかったことである。 Na^+ -ベントナイトは、親水性のため境界面が拡散的になっている。このため境界面に無視できない濃度境界層があり、通水によりそれがもや状の縦縞として浮上したと考えられる。縦縞間隔は数mmで、流送限界付近ではその間に鱗状の微小な横縞が現れた。せん断応力の増加と共に鱗状の横縞は消滅するが、縦縞はその間隔がより密になって移動床部全域に現れた。観察の限りでは、縦縞の間隔は一樣でcoherent性は認められなかった。このグループでは粘度が $10\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以上と大きな条件でも、粒子が一樣に浮上するのが観察され、 $\tau = 1\text{N}/\text{m}^2$ の条件で一時間通水すると、数mmの河床低下が認められた。この場合、破壊は起こらず通水後の河床は表層の数mmがそれより深より柔らかかった。 η_1 が $0.3\sim 2.5\text{Pa}\cdot\text{s}$ では、波長 数cm、波高 $2\sim 3\text{mm}$ 程度の波状河床が形成され、それが下流へゆっくり移動する。しかし河床に亀裂やひびは生じなかった。最後には、波状河床の crest部が $0.01\sim 0.02\text{ m/s}$ の速度で押し潰されながら破壊が進行した。 η_1 が $0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以下では、流送限界より小さいせん断応力で、波長 $3\sim 4\text{mm}$ 、波高 $0.5\sim 1\text{mm}$ の内部波が発生した。せん断応力の増加に伴い粒子の浮上も激しくなり河床流動も観察された。この場合、破壊が定義できなかった。このグループの底泥は、 η_1 が $0.3\sim 2.5\text{Pa}\cdot\text{s}$ で波状河床を形成したが亀裂などが生じなかったのは、主な吸着陽イオンが Na^+

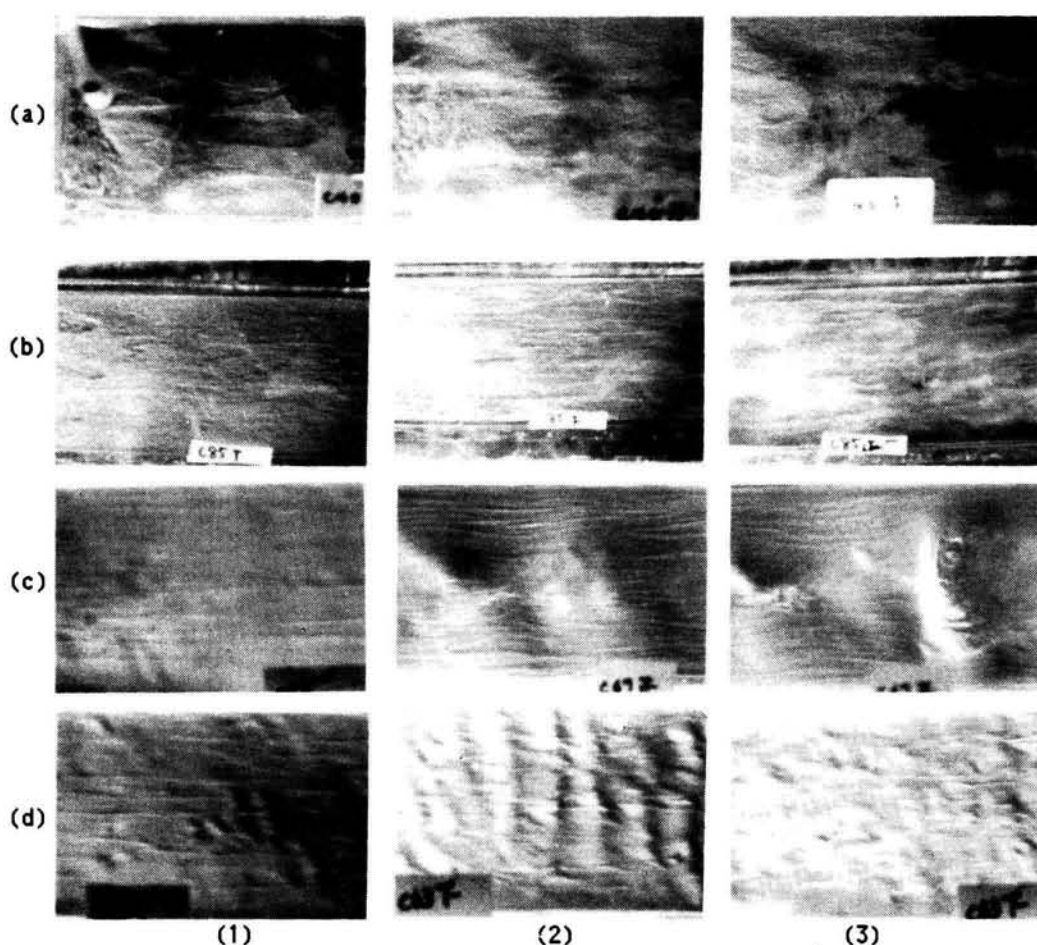


写真 3-1 底泥の流送形態の代表的な例

(a) Kasumi Mud 1, $w = 530\%$

(b) Kasumi Mud 4 (Kasumi Mud 1を H_2O_2 で加熱処理した後、
寒天を 10%含有させたもの), $w = 515\%$

(c) 澱粉含有ベントナイト (含有率 10%), $w = 230\%$

(d) 高含水比条件のベントナイト, $w = 440\%$

であったためと考えられる。一般に、一面の陽イオンの吸着により、粘土の延性は大きくなり脆性強度は小さくなる。 Na^+ -粘土は延びはよいが腰の強さは小さいという特性がある。波状河床が形成され、それがゆっくり下流へ移動するという状態は、底泥が降伏はしたが切断せずに延びていることであり、 Na^+ -粘土はその条件を満たす。

3.3.4 底泥の代表的な流送形態

底泥の流送形態について代表的なものを写真 3-1 に示す。⁸⁾ 一連の写真は、せん断応力の

増加に伴う河床状態の変化を示す。番号の若い方から順にせん断応力が増加している。

写真 3-1(a) は Kasumi Mud 1 の場合であり、第一底泥グループの代表的な流送形態である。せん断応力が流送限界より小さい時の床面は滑面状で、流送限界を越えるとアバタ状の床面となった。せん断応力の増加とともに粒子の浮上が活発になり、波状河床が形成されて trough部に亀裂が生じ、その部分から破壊が進行していった。写真 3-1(b)は Kasumi Mud 4 の場合で、延性の乏しい底泥の流送形態の一例である。表面には、 $100\mu\text{m}$ 前後の粒子が目立つ。せん断応力が流送限界を越えると、底泥粒子が一様に浮上し、せん断応力と共に浮上する粒子の量も増加し、河床低下が速やかに進行するが、破壊は観察されなかった。写真 3-1(c) は澱粉含有ベントナイト（含有率 10%）で、最初河床面にもや状の縦縞が現れ、せん断応力の増加と共に波状河床が形成され、その後 crest部が押し潰されるように破壊した。これが第二底泥グループの代表的な流送形態である。写真 3-1(d) は高含水比のベントナイトの場合で内部波が認められた。せん断応力の増加と共に浮上が激しくなり河床も流動した。

3.3.5 流送形態に及ぼす澱粉および寒天含有の影響

この節の最後に澱粉および寒天含有が底泥の流送形態に及ぼす影響について述べる。澱粉含有によって底泥は延性効果を増し、カオリナイトも Kasumi Mud 3 も波状河床を形成するようになった。延性効果の極端な例として、澱粉含有ベントナイトの場合、流れと直角方向に鋭い峰を持った三角柱形状が形成され、それがゆっくりと下流へ移動した。¹⁾ この現象は、底泥自体は流動しているが、切断されていないため起こったものと考えられる。寒天含有によっては、澱粉含有の場合とは逆に、底泥は脆性強度は増すが延性効果は減少する傾向がある。これは、寒天含有土の場合、構造単位となる粒径が大きいことも原因しているであろう。寒天含有土は、比較的等方体の塊として離脱・浮上する。流送形態には、常温における澱粉および寒天の変形に対する特性、すなわち澱粉は腰はないが粘りが強いという特性がおよび寒天は腰は強いが粘りが弱いという特性がある程度反映された結果となった。

第 3.4 節 二つの底泥グループと限界掃流力

底泥は流送形態の特徴から二つのグループに分類されたわけであるが、この二つのグループは底泥の限界掃流力の定式化の際にも区別された。底泥の限界掃流力と各種の物性項目との関連を検討した結果、限界掃流力は底泥の粘度 η_1 と良好な対応関係を示し、両者の関係は二つの底泥グループごとに一定の実験式としてまとめられた。また、第一グループの底泥については、限界掃流力は底泥の降伏値 τ_{y1} とも良好な対応関係が認められた。しかし、第二グループの底泥は降伏値を持たないのでこのような関係は存在しない。

3.4.1 限界掃流力と流動特性の関係

底泥の浮上・流送特性と流動特性との関係を検討するにあたり、流動特性としてどの特性値を選ぶべきかという問題がある。著者は、当初は簡易型粘度計を用い、それにより得られる粘度と二つの限界掃流力との関係を検討した。しかしこの粘度計は必ず速度が変えられな

いため、非ニュートン流体の場合には、あるずり速度における見掛けの粘度しか測定できない。底泥の流動曲線は第5章で示すようにかなり複雑なものであるので、上記の見掛けの粘度では底泥の流動特性を代表しているとは言い難い。実際、簡易型粘度計で求めた粘度と二つの限界掃流力との関係は、同一底泥であれば粘度が大きい場合ほど流送限界および破壊限界の値は大きくなったが、底泥が異なる場合には同一含水比での粘度が大きな底泥が必ずしも両限界値が大きくなる結果となった。^{9),10)}

図 3-8 は、今回測定したずり速度が増加してゆく場合の典型的な底泥の流動曲線である。(a)が第一底泥グループの場合で、(b)が第二底泥グループの場合である。

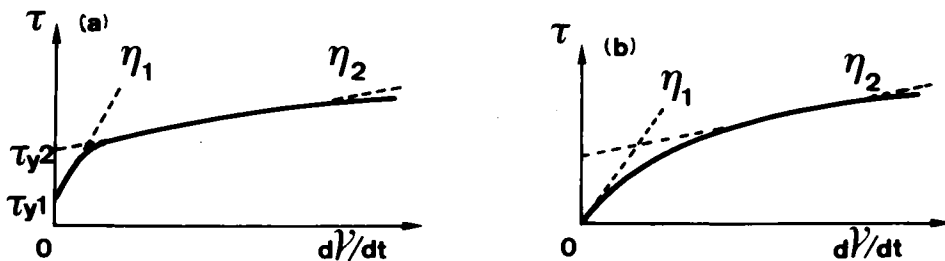


図 3-8 底泥の典型的な流動曲線（ずり速度が増加してゆく場合）

底泥の離脱・浮上現象は、河床に静止している底泥粒子が流れから力を受けて動き出す現象なので、離脱・浮上時の底泥のずりもずり速度も小さいと考えられる。そのため流動特性としても、その範囲の特性を示すものが必要となる。この条件に合うのが粘度 η_1 と降伏値 τ_{y1} であり、これらの特性値と二つの限界掃流力との関係を検討した。図 3-9 および図 3-10 は、それぞれ流送限界および破壊限界と粘度との関係を示したものである。両限界とも、各底泥グループごとに粘度 η_1 との間に次のような一義的な関係が認められる。

$$\text{流送限界} \quad \tau_{c1} = a \eta_1^\alpha \quad (\tau_{c1} : \text{N/m}^2, \eta_1 : \text{Pa}\cdot\text{s}) \quad (3-1)$$

$$\text{破壊限界} \quad \tau_{c2} = b \eta_1^\beta \quad (\tau_{c2} : \text{N/m}^2, \eta_1 : \text{Pa}\cdot\text{s}) \quad (3-2)$$

ここで、 a 、 b 、 α 、 β は実験定数で、その値を表 3-1 に示す。表 3-1 には上記 2 式の適用範囲も示す。両限界値とも、 η_1 が $0.05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 以下になると底泥グループの差がなくなる。図 3-9 および図 3-10 には、二つの底泥グループの差が明確に現れている。3.2.4 の図 3-1 および図 3-2 における両限界値と含水比の関係では二つのグループの差が現れなかった。二つの限界値は含水比が大きくなれば小さくなるという一定の傾向は示したが、その値は底泥の種類により異なった。式 (3-1) および式 (3-2) の関係は実験的なものではあるが、底泥の種類が異なっても粘度 η_1 が同一であれば両限界値が同じになることを示す。実用的には、式 (3-1) および式 (3-2) で底泥の限界掃流力を規定できるが、両式は次元が合わないの、 a および b は次元を持った実験定数ということになる。

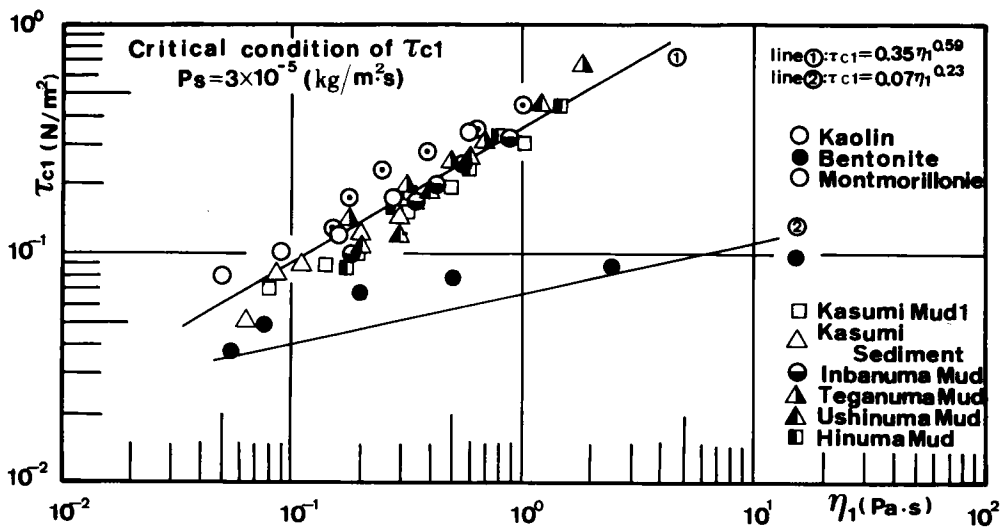


図 3-9 流送限界 τ_{c1} と粘度 η_1 の関係

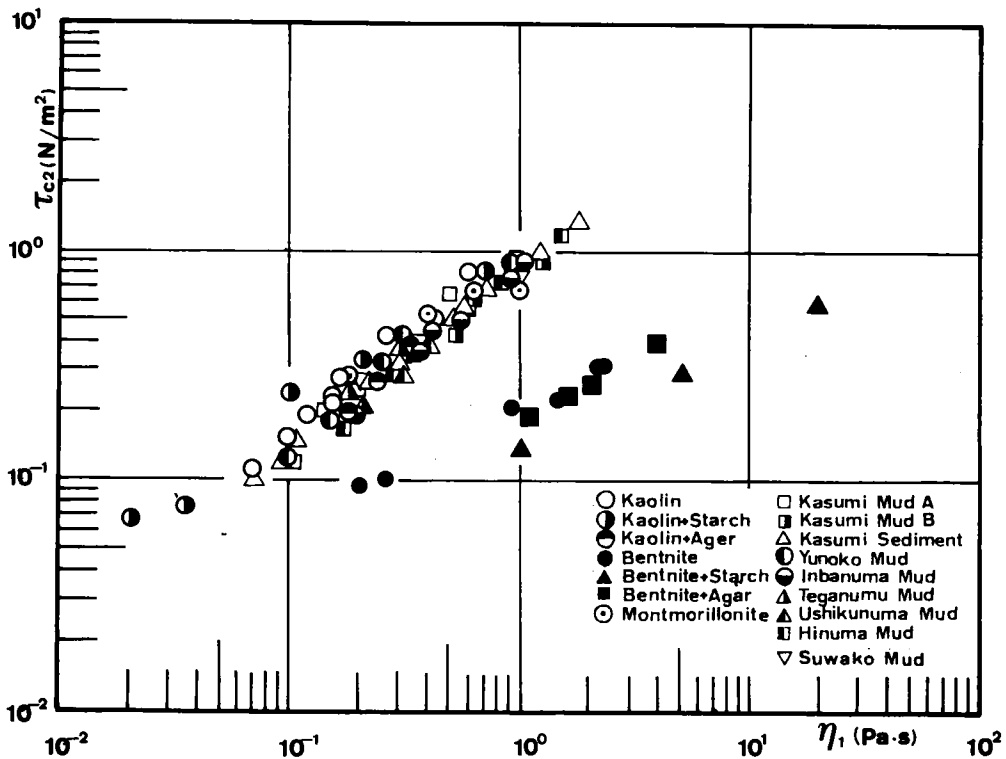


図 3-10 破壊限界 τ_{c2} と粘度 η_1 の関係

表 3-1 式 (3-1), 式 (3-2) 中の実験定数の値および両式の適用範囲

| | | The first Mud group | The second Mud group |
|-------------|------------------|---|---|
| τ_{c1} | adaptable ranges | $0.05 < \eta_1 < 4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ | $0.1 < \eta_1 < 20 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ |
| | a | 0.35 | 0.07 |
| | α | 0.59 | 0.23 |
| τ_{c2} | adaptable ranges | $0.05 < \eta_1 < 2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ | $0.1 < \eta_1 < 20 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ |
| | b | 0.92 | 0.2 |
| | β | 0.85 | 0.46 |

τ_{c1} : The limit of mud particles movement.

τ_{c2} : The limit of bed destruction.

さらに、第一底泥グループについては、二つの限界掃流力と降伏値 τ_{y1} の間にも一定の関係が認められた。図 3-11 および図 3-12 は、それぞれ流送限界および破壊限界と τ_{y1} との関係を示したものである。両図から、次の実験的關係が導かれる。^{1), 11)}

$$\text{流送限界} \quad \tau_{c1} = 0.27 \tau_{y1}^{0.56} \quad (\tau_{c1} : \text{N/m}^2) \quad (3-3)$$

$$\text{破壊限界} \quad \tau_{c2} = 0.79 \tau_{y1}^{0.94} \quad (\tau_{c2} : \text{N/m}^2) \quad (3-4)$$

式 (3-4) より、第一底泥グループの底泥の破壊限界 τ_{c2} は降伏値 τ_{y1} にほぼ正比例し、さら

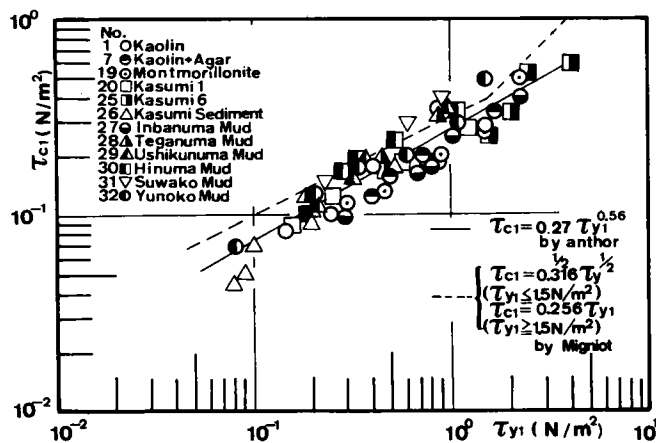


図 3-11 流送限界 τ_{c1} と降伏値 τ_{y1} の関係

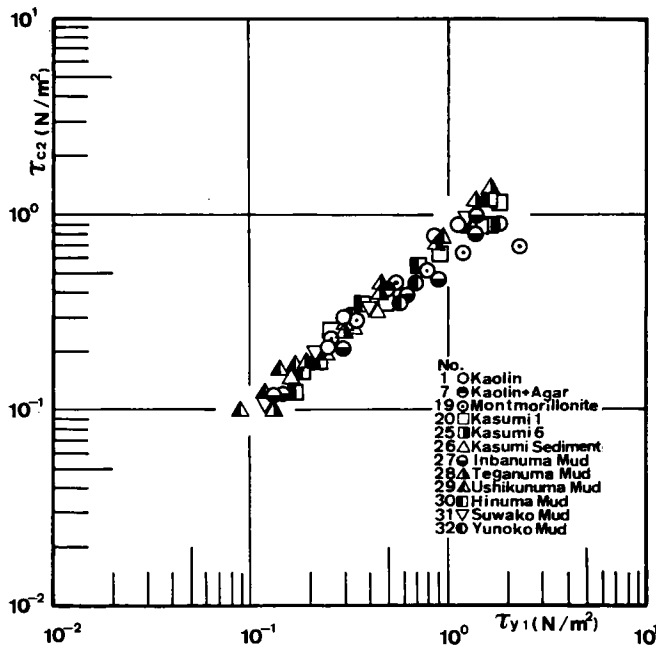


図 3-12 破壊限界 τ_{c2} と降伏値 τ_{y1} の関係

に値自体もほぼ等しいことがわかる。実験結果も流送限界 τ_{c1} と τ_{y1} との関係よりバラツキが少ない。破壊限界が降伏値より若干小さめとなる理由としては、次のことが考えられる。降伏値は二重円筒式回転粘度計を用いて測定されるため（第5.2節 参照）、底泥はせん断方向以外は運動が規制され、作用する力も場所的に一様で時間的変動もない。一方、流送実験では、底泥は上向きにいくらか自由度を持ち、また作用する力も必ずしもせん断方向でなく場所的にも時間的にも変動し、さらに底泥の表面の凹凸や固定床との接続部分などには応力が集中し、流れの平均せん断応力より大きなせん断応力が作用する。また、降伏値は底泥の内部構造の平均的な強度を示す量であるのに対して、破壊限界値は底泥の内部構造の弱い箇所や応力の集中した箇所の挙動を反映したものなりやすい。これらの箇所は底泥面の他の箇所より破壊しやすく、他の箇所が破壊に至らないような流れの平均せん断応力によっても破壊する。以上の理由により、破壊限界値は降伏値より小さめになると考えられる。しかし、図 3-12 の結果より、第一底泥グループの破壊限界は降伏値 τ_{y1} と直接結びつけられた。

図 3-11には、Migniot¹²⁾によって得られた限界掃流力と降伏値の実験式も併示してある。Migniotの実験式は、次式で表される。

$$\begin{aligned} \tau_c &= 0.316 \tau_y^{1/2} & (\tau_y \leq 1.5 \text{ N/m}^2) \\ \tau_c &= 0.256 \tau_y & (\tau_y \geq 1.5 \text{ N/m}^2) \end{aligned} \quad (3-5)$$

今回の実験範囲では、Migniot の実験式は流送限界に対してかなりよい近似式となっている。Migniotの限界状態の定義も著者と同様なものであった。Migniotの定義した限界掃流力の結果と今回定義した流送限界の結果との良好な対応関係は、両者の実験結果を相互に検証した形となった。Migniotが得た粘着性土の限界掃流力が降伏値で規定されるという結果は、従来あまり注目されなかった。その理由としては、Migniot の論文が発表された頃は高含水比の浮上・流送特性の研究は少なく、低含水比では限界掃流力は土のせん断強さ（降伏値）に比して非常に小さいことが明らかにされていたからである。近年の高含水比の底質に対する研究においても、降伏値としてビンガム降伏値（図 3-8 の τ_{y2} に相当）を用いたため、限界掃流力はその降伏値よりかなり小さな値となり、このことも降伏値が底泥等の限界掃流力を規定するものとして注目されなかった一因であろう。降伏値として他の研究者が τ_{y1} ではなく τ_{y2} を用いたのは、Migniot自身の τ_y の定義が明確でなかったこともあるが、従来の通常の粘度計では η_1 や τ_{y1} を求めるのが困難であったことも大きな要因であろう。Migniot は式 (3-5)の成立する理由については、あまり深く言及していない。このことも Migniotの結果が多くの研究者の支持を得られなかった一因であろう。

底泥の限界掃流力を流送実験によらず推定したい場合は、その底泥の粘度 η_1 もしくは降伏値 τ_{y1} を測定すればよい。次に述べる底泥の特徴から、限界掃流力を知りたい底泥がどの底泥グループに属するかを判断し、先に示した各底泥グループの粘度 η_1 および降伏値 τ_{y1} と限界掃流力の関係から底泥の限界掃流力が推定できる。第一底泥グループは、 η_1 からでも τ_{y1} からでも推定できるが、降伏値 τ_{y1} が 0.15N/m^2 以下では誤差が大きくなるので粘度 η_1 によったほうがよい。第二底泥グループは、降伏値が存在しないので粘度 η_1 から推定するしかない。 η_1 や τ_{y1} が測定できない場合、第一底泥グループに対しては、ある程度は最終沈降体積比から間接的に推定可能であるが、これについては 5.5 節で述べる。

3.4.2 二つの底泥グループの特徴

3.4.1では、流送形態で二つに分類された底泥グループは、限界掃流力と粘度 η_1 および降伏値 τ_{y1} との関係においても明確に区別されることを述べたが、ここでは二つの底泥グループにおける物性や流送形態の特徴についてまとめておく。

底泥の各種物性の特徴を二つのグループで対比して検討した結果、粒度構成、比重、灼熱減量比およびコンシステンシーには、二つの底泥グループ間で特性の違いが認められなかったが、沈降特性や流動特性には二つの底泥グループ間で際立った違いが認められた。表 3-2 は二つの底泥グループの沈降特性、流動特性および流送形態の特徴を整理したものである。

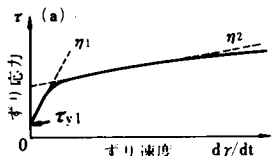
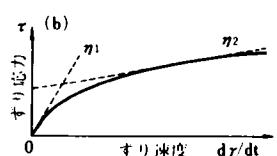
第一底泥グループは次のように特徴づけられる。静置状態で界面沈降を呈すること、流動曲線に降伏値 τ_{y1} と曲線の急な折れ曲がりが存在すること、および流送時には河床面にヒビや亀裂が生じその部分から破壊するが河床全体としての流動はないことである。一方、第二底泥グループは次のように特徴づけられる。静置状態では沈積面が現れその上に微細粒子の安定した分散系が存在すること、流動曲線には降伏値が現れずベキ法則が成立すること、および流送時にはモヤ状の凝集が現れ河床に亀裂は生じないが波状河床の流動がみられることである。

これらを総合すると、第一グループの底泥は、高含水比では不安定で凝集しやすく、低含

水比では降伏値をもつなど脆性強度は発揮するが延性乏しく小さな変形量で破断する。第二グループの底泥は、高含水比では安定で分散しやすく、低含水比では脆性強度はないが延性を持ち変形量が大きい。これらの諸性質を規定するものは底泥粒子に吸着している交換性陽イオンの種類や有機物質の種類である。詳しい考察は後章に譲るが、例えばペントナイトの吸着陽イオンを Ca^{2+} に、モンモリロナイトのそれを Na^{+} に置換させれば、底泥の各特性が逆転することを実験的に確認した。

対象となる底泥がどちらのグループに属するかは、その底泥の沈降形態もしくは流動曲線から推定することができる。この場合、沈降実験ならば試料の初期含水比は 500% 以下が、流動曲線を測定するのならば含水比は 500% 前後が望ましい。しかし、通常の現地泥はほとんどが第一底泥グループに属すると考えられる。

表 3-2 二つの底泥グループの特徴

| | 第一底泥グループ | 第二底泥グループ |
|--------|---|--|
| 底泥の種類 | <ul style="list-style-type: none"> ・カオリナイト主成分粘土 ・モンモリロナイト ・現地泥 | <ul style="list-style-type: none"> ・ペントナイト主成分粘土 |
| 吸着陽イオン | Al^{3+} , Ca^{2+} , H^{+} | Na^{+} |
| 沈降形態 | <ul style="list-style-type: none"> ・界面沈降（沈降粒子層と清澄層の間に明瞭な界面が形成される） | <ul style="list-style-type: none"> ・自由沈降（大きな粒子は独立に沈降し沈積面を形成する。微細粒子は長時間水中に懸濁する） |
| 流動曲線 |  <ul style="list-style-type: none"> ・降伏値 τ_{y1} の存在 ・流動曲線の折れ曲り |  <ul style="list-style-type: none"> ・降伏値なし ・滑らかな流動曲線（ベキ法則） |
| 流送特性 | <ul style="list-style-type: none"> ・水との明確な境界面 ・ヒビや亀裂の発生 ・波状河床が形成された場合、波状の谷部にヒビが生じて破壊 ・河床全体の流動なし | <ul style="list-style-type: none"> ・水との境界面はモヤ状 ・ヒビや亀裂は発生しない ・波状河床が形成された場合、波状の山部が押し潰されて破壊 ・河床全体が流動 |

3.4.3 限界掃流力と底泥の基本的物性との関係

この節の最後に、限界掃流力と含水比により変化しない底泥の基本的物性項目との関係について簡単に述べる。粒度構成・真比重・灼熱減量比およびコンシステンシー指数には二つの底泥グループの間で差が認められず、これらの物性項目によっては二つの底泥グループの分類はできない。またこれらの物性項目と限界掃流力との間には以下に述べる関係や傾向が認められたが、これらの物性項目は粘度や降伏値とは異なり限界掃流力を直接に規定できるようなものではない。

(i) 粒度構成の影響

粘土と湖沼泥間には、流送限界や破壊限界に及ぼす粒度の効果は顕著でない。湖沼泥の場合は、粒度構成自体に大きな差がないので、両限界値にもその影響が現れなかったとも考えられる。粘土では粒径が同程度であるのにも関わらず、吸着陽イオン等の影響により両限界値に大きな違いが現れる結果となった。しかし、平均粒径が $50\mu\text{m}$ 以上となる河口部泥では粒度の影響が現れ、流送限界および破壊限界の値が湖沼泥の場合よりかなり小さくなり、その値は露ヶ浦有機物処理泥と同程度となった。河口部泥の両限界値が湖沼泥のそれらに比して小さくなったのは、粒径が大きくなったことにより比表面積が減少し、表面力や膠結物質の割合が減少したためと考えられる。

(ii) 真比重と灼熱減量比との関係

同一含水比条件での流送限界および破壊限界の値は、比重の小さなものほど、逆に灼熱減量比の大きなものほど大きくなる傾向があった。灼熱減量比は含有有機物量の尺度であるので、この傾向は底泥中の含有有機物が多いほど、底泥の限界掃流力が大きくなることを意味している。

(iii) コンシステンシー指数とその関連

全般的な傾向としては、液性限界が高い底泥ほど流送限界および破壊限界が大きい。澱粉含有により液性限界の低下した粘土は二つの限界掃流力とも低下し、寒天含有により液性限界が増大した粘土は二つの限界掃流力とも増大する。これらの結果は液性限界はせん断強度を反映する量であるという見解を支持するものである。一方塑性限界はその値の大小が必ずしも全種類の底泥の浮上・流送特性に対して何らかの傾向を示す指標にはならなかった。例えば、カオリナイトや露ヶ浦底泥では澱粉含有により塑性限界が低下しそれにつれて延性が増大したが、湖沼泥と河口部泥では後者の塑性限界が小さいにも関わらず延性が乏しい流送形態となった。土質工学の分野でも、塑性限界値が単独で何らかの指標になりうるかという点は明確になっておらず、通常、液性限界と塑性指数で土の性質が議論されている。今回の結果では、塑性限界は高くても塑性指数が大きな底泥のほうが、塑性限界は低くても塑性指数が小さな底泥より延性的挙動は顕著となる傾向があったが、モンモリロナイトや Kasumi Mud 4 のような例外もあった。

第3.5節 限界掃流力に関する理論的考察

3.5.1 流送抵抗力

底泥が流送される際の抵抗としては、重力抵抗、粘着抵抗、界面張力および表面張力などが考えられる。界面張力は界面の面積が広ければ無視できる。表面張力は不飽和状態の土ではかなり大きい。粘着抵抗は、降伏値由来のものと粘度由来のものがある。前者は現象の時間スケールに無関係な抵抗力であり、後者は応力のかかる速度や変形速度などによって変化する抵抗力である。例えば、降伏値がなくて非常に高粘度の物質は、応力が大きくても作用時間が短ければ変形せず移動抵抗を発揮するが、応力が小さくても長時間作用すれば変形はゆっくりではあるが進行する。一方、降伏値を持つが粘度が非常に小さい物質の場合は、作用時間が短くても応力値が高ければ破壊し、小さな応力ではそれが長時間作用しても変形しない。一概には言えないが、粘度による破壊抵抗は延性強度に関係し、降伏値によるそれは脆性強度に関係すると考えられる。

粘着力の原因としては Van der Waals 力、水素結合、静電結合および膠結物質の存在などが考えられる。底泥に働く実際の引力はこれらの力の組み合わせであるのに加え、粒子の不規則な幾何形状とそれらのランダムな配列のため、粘着力を定量的に解き明かすことはほとんど不可能である。底泥の限界掃流力を評価するにあたって、粘度に起因する粘着抵抗力を含めるか否かの問題がある。応力の作用時間が短ければこの抵抗力も初期移動抵抗に寄与するが、流送現象の場合、せん断応力は常に底泥床面に作用しているので、粘度起因の粘着抵抗力は初期移動抵抗としては寄与できないと考えられる。そのため限界掃流力を評価するにあたっては、粘度起因の粘着抵抗を考慮せず、静的な釣り合い状態として現象を捉えるべきと考える。粘度起因の粘着抵抗力は底泥の運動に伴う力であって、むしろ第4章で底泥の飛び出し率を評価する際に重要な因子となる。

3.5.2 初期移動機構

底泥の流送を考えるにあたって二つの取り扱い方法がある。一つは底泥を連続体として考える方法で、他の一つは何らかの形状・大きさの粒状体の集合として考える方法である。前者の立場に立って、限界状態を密度流での内部波の碎破と対応付け、限界掃流力をクーリガン数で規定しようとする研究も行われた。³⁾ この場合、対象となる限界掃流力は破壊限界に対応する。図 3-13 は、破壊限界に対して $u_{*c2}/(\varepsilon \nu_1 g)^{1/3} (= K_1)$ と ν_1/ν との関係を示し

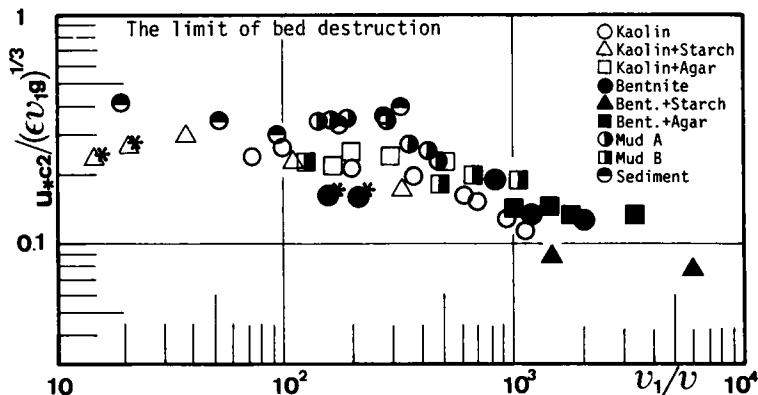


図3-13 破壊限界に対するクーリガン数

たものである。⁹⁾ ここで、 $u_{*c2} = \sqrt{\tau_{c2}/\rho}$ 、 $\varepsilon = (\rho_1 - \rho)/\rho$ であり、 ρ_1 は見掛けの密度、 ν_1 ($= \eta_1/\rho_1$)は底泥の動粘度および ν は水の動粘度である。 K_1 なる無次元量は、底泥の流送に対して粒径を無視しうるとして得られるものである。図 3-13 中、*印の付いたデータが実際に流送時に内部波として見なせるものが観察された場合である。今回の実験では、内部波は、粒径が小さくて分散しやすい底泥で、さらに破壊限界値が 0.1 N/m^2 程度の場合に観察された。図 3-13 では、底泥によっては K_1 の値が内部波が観察された場合の K_1 の値より大きいものにも関わらず内部波が現れてないことがわかる。 K_1 の値は ν_1/ν と函数関係にあり、 $K_1 = \text{const.}$ で底泥の限界掃流力を規定することはできないし、内部波が現れる条件も決められない。³⁾ どの底泥でも含水比が非常に高くなれば内部波が現れると考えられるが、第一底泥グループの底泥は自然状態ではそのような高含水比状態では存在し得ない。源粉含有カオリナイトの場合、実験では人為的に高含水比条件としたため内部波が現れたが、この懸濁体は静置すれば沈降し水層と分離する。さらに第一底泥グループの流送形態は、亀裂の発生という内部波の概念とは矛盾する現象が現れるので、この底泥グループの流送に関しては内部波的な取り扱いはいらないと思われる。

著者は、底泥の流送を考えるにあたって、その流送状態の観察をもとに粒状体的な取り扱いの立場をとった。底泥はほとんどの場合、河床から粒子状で離脱・浮上した。底泥の浮上現象を底泥粒子の離脱として捉える場合には、粒子に作用する流体力とそれに抗する抵抗力との競合として現象をみるわけであるが、その抵抗力としては 3.5.1 で述べたように、重力起因のものほかに粒子間の結合力が考えられる。しかし、粒子間結合力を定量的に評価するのは不可能に近い。そのため、本来、連続体的特性量である降伏値や粘度を取り上げ、これらは粒子間の複雑な結合力を包括的に反映しており、粒子間の粘着特性をも代表する量であると仮定して、これらによって粒子間結合力を評価した。

底泥の限界掃流力を理論的に評価するに先立って、底泥の場合にはどの離脱様式が主要となるかを検討する。底泥の浮上・流送現象を粒状体的に取り扱う場合、初期移動の形態としては転動離脱、揚力による浮上離脱および滑動離脱が考えられる。転動離脱や揚力による浮上離脱では底泥粒子を隣接する粒子から引き剥がす必要があり、滑動離脱では底泥粒子をずり剥がす必要がある。そのため引き剥がしに要する力とずり剥がしに要する力を評価して、その大小によりどの離脱様式が主要となるかを判定する。

まず、引き剥がしに必要な力を簡単なモデルで試算する。粒子径 d_* の粒子が隣接しその間隙を粘度 η_1 の物質が埋めているとする。簡単のため降伏値はゼロで水中重量も無視できるとする。結合部分を 1 辺 d_* の矩形で厚さを h_* とする。図 3-14(a) は、結合部分を拡大した説明図である。最初、二つの粒子間の粘着物質は接触面積 d_* 、厚さ h_* で存在しており、それを鉛直方向に力を加えて結合部面積を 0 にした時引き剥がしが完了したと考えられる。結合部分の中心点から、水平方向に x 軸を定義する。紙面に直角方向に y 軸を考え、粘着物質の挙動は x 軸と同じとする。 $x = \pm X$ 、 $y = \pm X$ で囲まれる断面から単位時間に通過する粘着物質の量は、粘着物質の移動に伴う結合部分の単位時間当りの変形量に等しいという関係から式 (3-6) が成立する。¹³⁾

$$8x(h_*^3/12\eta_1)(dP/dx) = 4x^2(dh_*/dt) \quad (3-6)$$

式 (3-6) の左辺が通過量，右辺が変形量である。ここで， h_f は粘着物質の厚さ， P は圧力である。 $x = X$ で $P = 0$ という境界条件で式 (3-6) の両辺を x について積分すると，圧力 P は

$$P = 3(\eta_1/h_f^3)(dh_f/dt)(x^2 - X^2) \quad (3-7)$$

で表される。引き剥がしに必要な力 F と圧力 P の間には，

$$F = \int_0^X (8Px) dx \quad (3-8)$$

なる関係がある。式 (3-7)，式 (3-8) より

$$F = -6X^4 (\eta_1/h_f^3)(dh_f/dt) \quad (3-9)$$

なる関係が導かれる。さらに，引き剥がし過程では粘着物質の容積 V_* は一定で， $V_* = 4X^2 h_f = d_*^2 h_*$ が成立する。この関係を式 (3-6) に代入し，両辺を t について積分して $t = t_d$ において $h_f \rightarrow \infty$ とすると

$$Ft_d = -(3/32) \eta_1 (V_*^2/h_*^4) = -(3/32) \eta_1 (d_*^4/h_*^2) \quad (3-10)$$

となる。式 (3-10) が引き剥がしに必要な力積である。

次にずり剥がしに必要な力積を求めることにする。図 3-14(b) で，ずれが x 軸方向のみにおこり，せん断応力はずり剥がし過程中一定と仮定する。この場合の力積は

$$\int_0^{t_d} F' dt = d_* \int_0^{t_d} \{ (d_* - vt) \eta_1 (dv/dz) \} dt \quad (3-11)$$

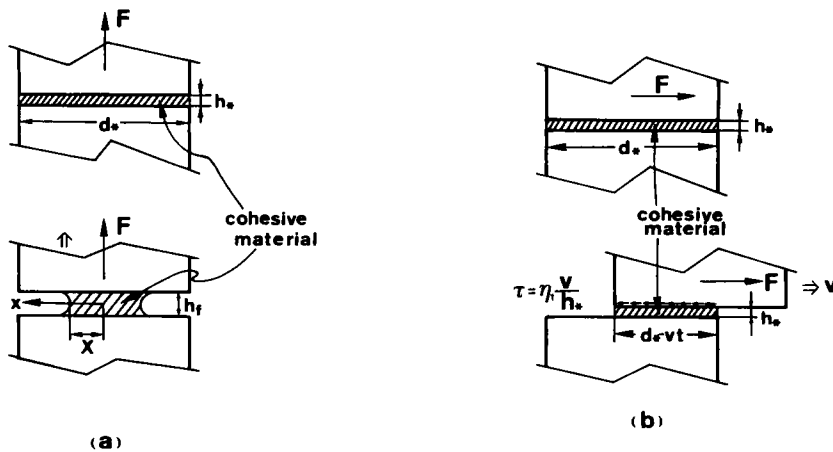


図 3-14 底泥粒子の離脱過程の模式図

となる。ここで、 F' はずり割がし力、 v は粒子の移動速度で仮定より一定値、 d_* ($d_* - vt$)はせん断応力の作用面積である。 $t = t_d$ で粒子のずり割がしが終了したと考えると、 $v = d_*/t_d$ 、 $dv/dz = d_*/(h_* t_d)$ が成立する。これらの関係を式 (3-11)に代入して整理すれば、

$$\bar{F} t_d = \int_0^{t_d} F' dt = (d_*^3/h_*) \pi_1 \int_0^{t_d} \{1 - (t/t_d)\} dt = (1/2)(d_*^3/h_*) \pi_1 \quad (3-12)$$

となる。ここで、 \bar{F} は t_d 時間内の力の平均値である。式 (3-12) がずり割がしに必要な力積である。

式 (3-10)、式 (3-12)はいずれも限界時の静的釣り合い状態を示したものではなく、動き始めてから離脱するまでに必要な力積を示したものであるが、両式ともその力積が離脱に要する時間に無関係となることを示し興味深い。さてここでは、 t_d 時間に粒子が離脱する場合に必要な力の大小によって、引き割がしによる離脱とずり割がしによる離脱とで、どちらが起こりやすいかを判定する。 F と \bar{F} の大きさの比を F_* とし、 $a_* = h_*/d_*$ とすると、 F_* は式 (3-13) となる。

$$F_* = |F|/|\bar{F}| = (3/16)(d_*/h_*) = (3/16)(1/a_*) \quad (3-13)$$

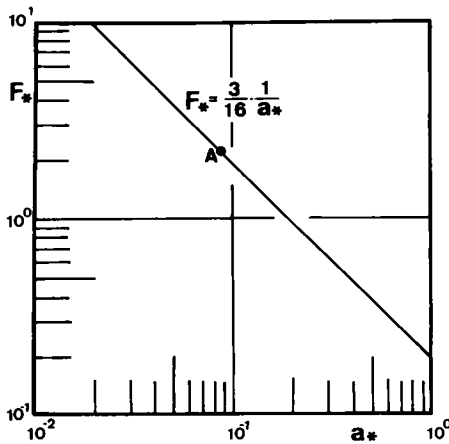


図 3-15 F_* と a_* の関係

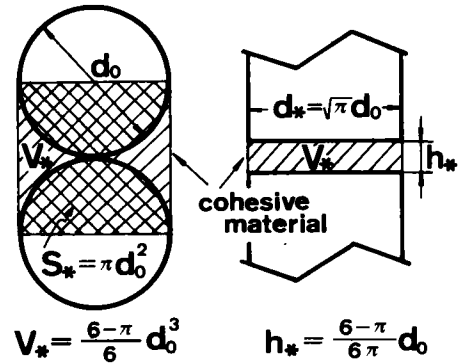


図 3-16 単純立方充填での d_* および h_* のモデル

図 3-15 は F_* と a_* の関係である。 $a_* \leq 3/16 (=0.1875)$ で $F_* \geq 1$ なる関係があり、 a_* が小さくなるほど F_* は反比例して大きくなる。いま、粒子の充填型式として、 a_* が最も大きくなる球粒子の単純立方充填を考える(図 3-16)。粒子の直径を d_0 とすると上下の粒子間の間隙容積 V_* は $(6-\pi)d_0^3/6$ となる。一方、上下の粒子が相対している面積 S_* は πd_0^2 である。換算結合部厚さ h_* を V_*/S_* で、換算結合部長さ d_* を $(V_*/h_*)^{1/2}$ で定義すれば、 h_* および d_* は $h_* = (6-\pi)d_0/6\pi$ 、 $d_* = \sqrt{\pi}d_0$ となる。これらの h_* 、 d_* の値を式 (3-13) に代入すれば、

$$F_s = (3/16)\sqrt{\pi}(6\pi)/(6-\pi) = 2.19 > 1 \quad (a_w : 0.086) \quad (3-14)$$

となり、図 3-15ではA点で示される。式 (3-14) より、最も a_w が大きいと考えられる充填方式においても、ずり剥がしによる離脱のほうが起こりやすい（力積が少なくてすむ）ことがわかる。一般に、粘着が支配力となっている状態では、 $d_m \gg h_w$ が成立していると考えられ底泥の場合も例外でない。以上の考察により、底泥の離脱様式は力の少なくてすむ滑動離脱（ずり剥がれ）が主要となり、転動離脱や揚力による浮上離脱（引き剥がれ）は補足的なものであると判断した。観察結果でもそれは確認された。河床から一旦離脱してしまった後は、底泥粒子は滑動から跳躍・浮遊まで種々の形態で流下するのが観察された。

3.5.3 限界掃流力に及ぼす重力の影響

3.5.1に述べた主旨に沿って、底泥の離脱に関する限界状態を静的釣り合い状態として捉える。この状態での釣り合い式は

$$\tau_c = \tau_{cg} + \tau_y \quad (3-15)$$

となる。ここで τ_c は限界掃流力、 τ_{cg} は重力に起因する摩擦力、 τ_y は移動粒子周辺の降伏値である。 τ_{cg} は

$$\tau_{cg} = k_1(\rho_0 - \rho)gd_0 \quad (3-16)$$

で与えられる。ここで k_1 は比例定数、 ρ_0 、 d_0 はそれぞれ底泥粒子の代表密度と代表粒径である。 τ_y は

$$\tau_y = k_2 \tau_{y1} \quad (k_2 \leq 1) \quad (3-17)$$

と考えられる。底泥の限界掃流力を評価するに際して、 τ_{cg} を考慮する必要があるか否かを検討する。表 3-3 は ρ_0 および d_0 の代表的な値に対して $(\rho_0 - \rho)gd_0$ を求めたものである。①では、 ρ_0 および d_0 として表 2-4 に示した底泥の真比重と平均粒径を用いた。②および③では、4.4節においてモデル化した底泥の代表粒径と見掛け密度を用いた。②は粒子を球

表 3-3 代表密度および粒径に対する $(\rho_0 - \rho)gd_0$ の値

| | ρ_0 (t/m^3) | d_0 (μm) | A_3 | $(\rho_0 - \rho)gd_0$ (N/m^2) |
|---|-------------------------|----------------------|---------|--------------------------------------|
| ① | $\sigma=2.6$ | $d_m=20$ | — | 0.314 |
| ② | 1.2 | 38 | $\pi/6$ | 0.074 |
| ③ | 1.1 | 47 | 1 | 0.046 |

状と仮定した場合，③は立方体と仮定した場合である。代表粒子の密度と粒径はそれぞれ次式で与えられる。

$$\rho_0 = (1/A_3)(\rho_1 - \rho) + \rho \quad (3-18)$$

$$d_0 = [\{\rho + \sigma(w/100)\}/\rho]^{1/3} A_3^{1/3} d_m \quad (3-19)$$

ここで， ρ_1 は底泥の見掛け密度， ρ は水の密度， A_3 は体積に関する形状係数である。 ρ_0 および d_0 も含水比によって多少変化するが，ここでは平均的な値を用いた。含水比が高くなって降伏値 τ_{y1} が 0.1N/m^2 近くになった場合， τ_{cg} は k_1 の値によっては無視できないこともありうる。非粘着性粒子の場合，岩垣公式¹⁴⁾によれば，砂粒レイノルズ数 $Re_x (= u_{mc} d_m / \nu)$ が 0.79 以下では $k_1 = 0.14$ であり，Mantz¹⁵⁾の研究では， $0.03 < Re_x < 1$ において $0.28 > k_1 > 0.1$ である。底泥粒子の場合， k_1 がどの程度の値となるかは難しい問題である。微視的には，静止摩擦係数を生み出す機構と粘着抵抗を生み出す機構は別のものではなく，何らかの関わりを持っており区別するのは困難である。しかし上記の k_1 の値は砂粒子が互いに直接接触している場合の値であり，少なくとも表 3-3 の①の条件には適用できないと考えられる。高含水比の場合，①の条件では底泥粒子は水中に分散して直接接触していない。このとき①の条件は，逆に $\tau_{cg} = 0$ のモデルとなる（図 3-17(a) 参照）。②，③の条件は，モデル化の際に図 3-17(b) のように粒子の接触を考えているので， k_1 の値としては 0.2 程度の値を考えてもよい。その場合， τ_{cg} は $0.015 \sim 0.01\text{N/m}^2$ となり， τ_{y1} に比して約 10 分の 1 となる。よって通常の堆積状態では， τ_{cg} は τ_{y1} に比べて無視できる値と考えられる。

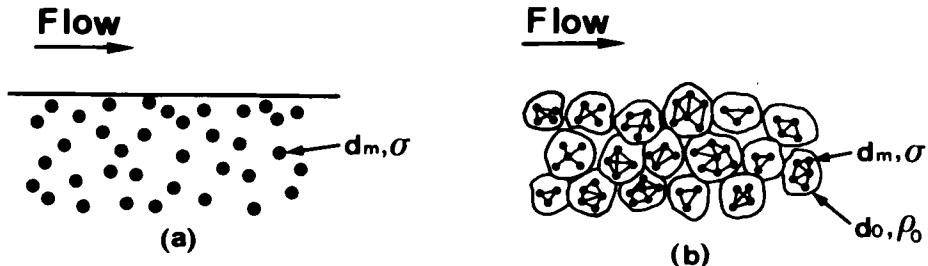


図 3-17 底泥の代表的粒子の密度および粒径のモデル

3.5.4 底泥の限界掃流力

τ_{cg} が無視できるとなると，限界状態での釣り合い式は，

$$\tau_c = \tau_y = k_2 \tau_{y1} \quad (3-20)$$

となる。降伏値 τ_y は，底泥が流体として流動し始める限界値であるので，式 (3-20) の τ_c は破壊限界 τ_{c2} に対応するものと考えられる。3.4.1における破壊限界に対する実験結果，即

ち、破壊限界 τ_{c2} は降伏値 τ_{y1} にほぼ比例し値そのものもほぼ等しいという結果も、式(3-20)の成立を裏付けている。 k_2 が 1 以下になる理由については 3.4.1 で考察した。

既往の研究のほとんどは、底泥の限界掃流力として流送限界に対する状態を考えているが、著者はここで限界掃流力として破壊限界を考えることを提案する。今回の実験では、破壊限界値が降伏値にほぼ等しいという関係も得た。従来の研究は低含水比条件のものが多く、降伏値が限界掃流力より非常に大きいという結果が指摘されてきたが、これは降伏値としてビンガム降伏値(図 3-8(a) の τ_{y2} に相当)を用い、限界掃流力として流送限界 τ_{c1} を用いているためと考えられる。^{16), 17)} 著者の実験でも、粘度 η_1 が大きくなり 1Pa·s 程度になると、 $\tau_{y2} \gg \tau_{y1} \gg \tau_{c1}$ の結果が得られた。流送限界は現象的には砂粒の移動限界に近いが、粘度 η_1 の増加と共に $\tau_{y1} \gg \tau_{c1}$ となり、現状では流送限界 τ_{c1} を規定できる抵抗力が見当たらない。

界面近傍で底泥の濃度境界層が発達し $(\eta_1)_{in} \gg (\eta_1)_{su}$ であるため、 $(\tau_{y1})_{in} \gg (\tau_{y1})_{su} \equiv \tau_{c1}$ が成立するという仮説も考えられなくもないが、第一底泥グループの底泥は界面が鮮明で $(\eta_1)_{in} \approx (\eta_1)_{su}$ である。ここで $(\eta_1)_{in}$ 、 $(\tau_{y1})_{in}$ は底泥層内部での粘度および降伏値であり、 $(\eta_1)_{su}$ 、 $(\tau_{y1})_{su}$ は界面近傍での粘度および降伏値である。また、仮に $(\tau_{y1})_{su} \approx \tau_{c1}$ としても

$$(\tau_{y1})_{su} \propto (\tau_{y1})_{in}^{1/2} \quad (3-21)$$

となる理由が必要となる。式(3-21)は両辺の次元が異なり、その合理的説明は現状ではできない。流送限界は、流れのせん断応力が平均的には $\tau < \tau_c$ にも関わらずせん断応力の変動のため瞬間値としては $\tau > \tau_c$ の状態が起こり、その時に離脱・浮上する底泥粒子の量が無視できなくなる限界と解釈される。即ち、流送限界は底泥の運動方程式に基づいた初期移動機構を検討することによって評価される性質のものと考えられる。このような観点から、流送限界を見直すと、今回の実験においては底泥粒子の飛び出し量 P_m の微小な一定値

$$P_m = \text{const.} = 3.0 \times 10^{-5} \quad (\text{unit : kg/(m}^2\text{s)}) \quad (3-22)$$

で流送限界と判定していたことが明らかとなった。

以上、底泥粒子の離脱の限界状態を静的釣り合いで捉え、破壊限界をもって底泥の限界掃流力と定義する。破壊限界値は基本的には降伏値と同一になるべきものであるが、流れの変動等の種々の原因により、実験的には式(3-4)の関係が得られた。

これまでの限界掃流力の議論は、降伏値の存在する第一底泥グループに適用できるものであって、 Na^+ -ベントナイトのような第二底泥グループには適用できない。第二グループの場合、底泥に降伏値が存在しないので、静的釣り合い条件としての抵抗力は重力抵抗のみである。図 3-9 において、第二底泥グループは粘度 η_1 が増加しても流送限界 τ_{c1} はあまり大きくならない。この事実も上記のことを裏付けている。しかし、 τ_{cg} の値が 3.5.3 で求めた程度の値とすれば、流送限界 τ_{c1} ですら τ_{cg} よりかなり大きな値となっている。第二底泥グループの場合、界面が不鮮明のことから、底泥表面の状態の解明がまず必要である。また実験で求めた流送限界および破壊限界には、粘度に起因する粘着抵抗の影響が含まれている可能性が

あるので、その点を含めて第一底泥グループの場合とは異なった考察が必要であろう。この点については今後の研究としたい。

第3.6節 結 論

本章では、底泥の限界掃流力に関する実験的および理論的研究について論じた。実験の結果、底泥の浮上・流送に関して流送限界と破壊限界という二つの限界状態を定義した。限界掃流力は同一含水比ではなく同一粘度条件でその値が規定された。流送限界および破壊限界の値は粘度 η_1 との間に両対数紙上で直線関係が得られたが、その関係は二つの底泥グループでは異なるものとなった。さらに第一底泥グループの場合、両限界は底泥の降伏値とも一定の関係があり、流送限界は降伏値の約 2分の 1 乗に比例し、破壊限界はほぼ正比例することがわかった。

自然界に堆積している底泥はほとんどが第一底泥グループに属すると考えられるので、理論的考察は主に第一底泥グループに対して行った。底泥の初期移動機構として、離脱に要する力積を各様式について評価した結果、滑動離脱が主要となることを導いた。さらに流送抵抗力として、重力起因の抵抗力は粘着力に比べて無視できることを示した。底泥の限界状態は静的釣り合い状態として捉えるべきと考え、結局降伏値のみが流送抵抗力となることを示した。そして、破壊限界が降伏値にほぼ一致するという実験結果から、底泥の離脱の限界条件として、 τ (流れの瞬間的なせん断応力) $\geq \tau_{c2}$ (破壊限界) を提示した。従来の研究では、流送限界 τ_{c1} が砂粒の移動限界に現象的に類似しているためにこれが底泥の限界掃流力と考えられてきたが、著者は、流送限界は粒子の離脱・浮上する量が無視できなくなるせん断応力の上限值という現象論的なもので、静的釣り合い状態では定義できないものであることを示した。著者が実験で求めた流送限界値は、飛び出し量がおおむね $3.0 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ となるせん断応力に対応していることがわかった。

参考文献

- 1) 大坪国順(1983): 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究, 国立公害研究所研究報告, 第42号。
- 2) 大坪国順・村岡浩爾・高野恒雄(1980): 粘性土の限界掃流力について, 第16回衛生工学研究討論会講演論文集, 140-146。
- 3) 堀井由彦・住友 恒・岩井重久(1979): 底泥の巻き上げに関する実験的研究(II), 第15回衛生工学研究討論会講演論文集, 28-33。
- 4) 馬場洋二・佐々木重義・伊藤雄二(1974): ヘドロ河床の流れによる洗掘特性, 土木技術資料, 16, (10), 28-33。
- 5) 大坪国順・村岡浩爾(1980): 底泥の限界掃流力について, 土木学会第35回年次学術講演会講演概要集第II部, 774-775。
- 6) Winterkorn, H.F. (1942): Mechanism of water attack on dry cohesive systems, Soil

Science, 54, 258-273.

- 7) Grissinger, E.H. (1966): Resistance of selected clay systems to erosion by water, Water Resources Res., 2, 131-138.
- 8) 村岡浩爾・大坪国順(1980): 底泥の限界掃流力に関する実験的研究, 国立公害研究所研究報告, 第14号, 33-55.
- 9) 大坪国順・村岡浩爾(1981): 底泥の物性と限界掃流力の関連について, 第25回土木学会水理講演会講演論文集, 73-78.
- 10) 大坪国順・村岡浩爾(1981): 底泥の限界掃流力と物性の関連について(II), 土木学会第36回年次学術講演会講演概要集第II部, 3-4.
- 11) 大坪国順・村岡浩爾(1983): 水界における底泥の挙動に関する研究, 国立公害研究所研究報告, 第47号, 85-94.
- 12) Migniot, P.C. (1968): Étude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques, Houille Blanche, 23, (7), 592-620.
- 13) 井本立也(1963): 概説レオロジー(上), 東京化学同人.
- 14) 土木学会編(1971): 水理公式集 昭和46年度改訂版, 土木学会.
- 15) Mantz, P.A. (1977): Incipient transport of fine grains and flakes by fluids - extended Shields Diagram -, Proc.A.S.C.E., 113, HY6, 601-615.
- 16) 栗谷陽一・楠田哲也・海田輝之(1979): 底泥の巻き上げに関する基礎的研究, 第15回衛生工学研究討論会講演論文集, 21-27.
- 17) 青木美樹・首藤伸夫(1982): 粘性土堆積層の洗掘現象に関する実験的研究, 第26回土木学会水理講演会講演論文集, 82-92.

第4章 底泥の飛び出し率

第4.1節 概 説

第3章で、底泥の限界掃流力を実験的に定式化することができたので、この章では次の段階として、底泥の飛び出し量について考察する。飛び出し量の定義は、単位時間・単位面積当りに底泥表面から離脱する底泥の質量であり、次元は $[ML^{-2}T^{-1}]$ である。底泥の浮上・流送問題の分野では「巻き上げ」とか「浮上」とかという言葉がよく用いられる。しかし、ここでは砂粒との統一性を考慮して、底泥の離脱・浮上を定量的に扱う場合には「飛び出し量」もしくは「飛び出し率」という言葉を用いることにする。飛び出し量の評価の方法としては、限界掃流力の場合と同様に、床面での底泥を一相の連続体として取り扱う方法と、底泥を何らかの大きさおよび形状をもった粒状体の集合として取り扱う方法とがある。

底泥の飛び出し量に関する研究は少なく、実験的にも個々の実験条件について求められている程度である。^{1), 2), 3), 4)} 飛び出し量に関する理論的な研究としては、Partheniades²⁾と細井⁵⁾の研究がある。Partheniadesは、底泥の離脱・浮上現象を粒状体として取り扱い、せん断応力の変動を考えて粒子の浮上する確率を求め、誘導した理論式が実験値に良く合うとした。しかし、離脱・浮上時の条件やそれに要する時間を実験値に合うように決めた点に問題が残る。細井は、底泥の飛び出し量を連続体モデルで考えた。Einstein & Liの粘性底泥層の発達・崩壊モデルを、水流層と泥層にそれぞれ考えて、泥層の浮上厚 δ なるものを導いた。しかし、 δ は流動層と考えるべきものであり、それと飛び出し率を結び付けるには解決すべき問題が多い。これは、密度流において界面の上および下層の流れが解析されたからといって、すぐには連行係数を評価できないことに対応している。

底泥の飛び出し量を研究するに際しても、実験データの集積が急務であった。そのため、3種類の粘土と6種類の現地泥について、含水比の条件を変えて飛び出し量を求めた。上記の二つの評価方法に基づいて飛び出し量を整理した結果、今回の実験条件の範囲内では、底泥の飛び出し量は粒状体として取り扱うのが適当であるという結論に至った。さらに、底泥粒子の初期移動に対して滑動についての運動方程式を考え、それに基づいて底泥の無次元飛び出し率の推定式を求め、実験結果とも比較した。

第4.2節 実験結果の概要

図4-1の一連の図は、飛び出し量 P_m とせん断応力 τ の関係で、各底泥ごとに纏めてある。全ての底泥において、含水比が高いほど、同一の τ に対する P_m の値は大きい。含水比 $w = 300\%$ および 350% のベントナイトを除いて、 P_m と τ の関係は両対数紙上でかなり急な勾配となっている。この関係は、比較的掃流力が小さい領域における砂粒の飛び出し率 p_s とせん断応力 τ の関数に類似している。

図中の*印は、 $\tau > \tau_{c2}$ の場合の結果である。各底泥とも $\tau < \tau_{c2}$ では、含水比 w が小さいほど P_m と τ の関係を示す勾配がわずかに緩くなる傾向がある。 $\tau > \tau_{c2}$ の状態では、河床に凹凸や亀裂が生じ、流れが河床に平行に作用しなくなって、付加せん断応力が大きくなっている。低含水比条件では、今回のせん断応力の範囲では破壊が起こらないこともあった。低含水比の Na^+ -ベントナイトにおいて $P_m \propto \tau$ の関係が認められるが、この場合には不鮮明な界面から微細粒子が一樣かつ連続的に浮上していた。 Na^+ -ベントナイトの場合、表面付近のごく薄い層での含水比は内側よりかなり高くなっていると推察される。

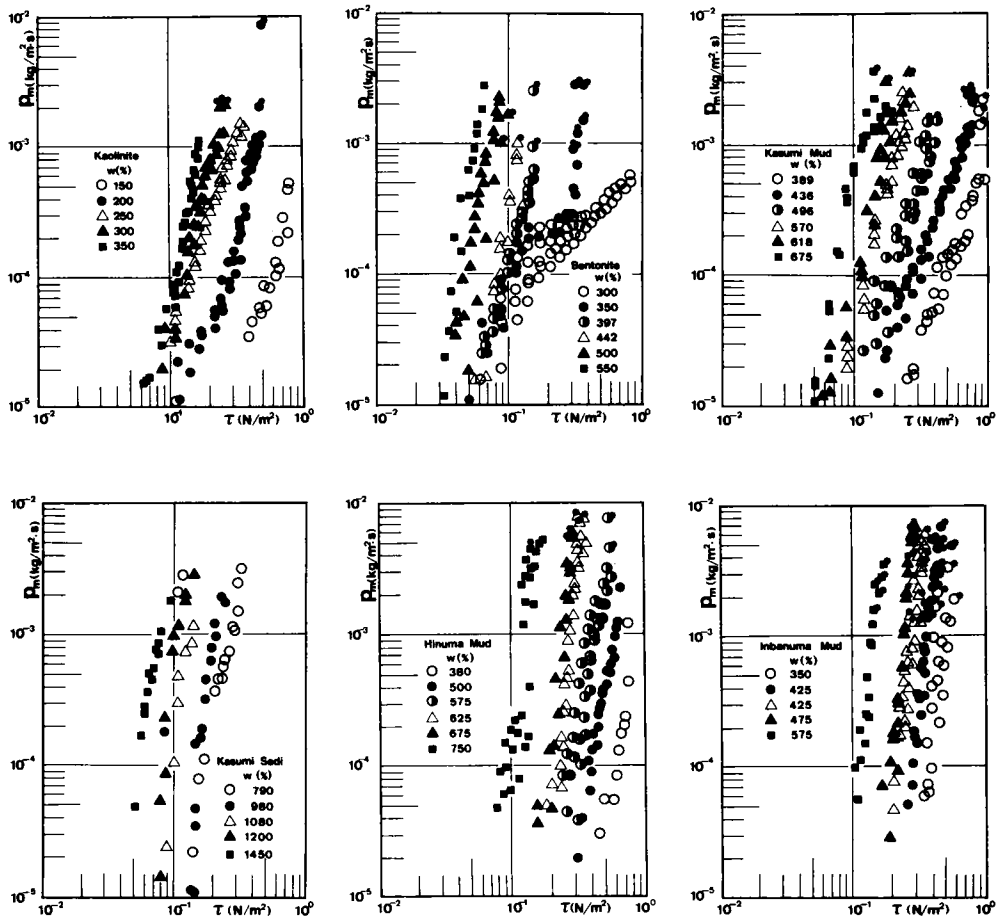


図 4-1 底泥の飛び出し量とせん断応力の関係

第4.3節 連行係数⁶⁾

底泥を連続体とみて、底泥粒子の浮上現象を密度流の界面の混合現象のアナロジーとして

捉える考え方がある。しかし、底泥の場合、相対密度がモンモリロナイトの0.027~0.063および霞ヶ浦沈降物の0.033~0.053を除いて0.1程度と大きいこと、相対粘度 η_1/μ が50~1000と非常に高いこと、さらに同一密度でも底泥の種類により粘度が異なることが普通の密度流と異なる。図4-1の結果を連行係数によって整理したものが図4-2である。 ρ_1 を底泥を連続体とみた場合の見掛け密度とすると P_m/ρ_1 が底泥の連行量となるので、それを摩擦速

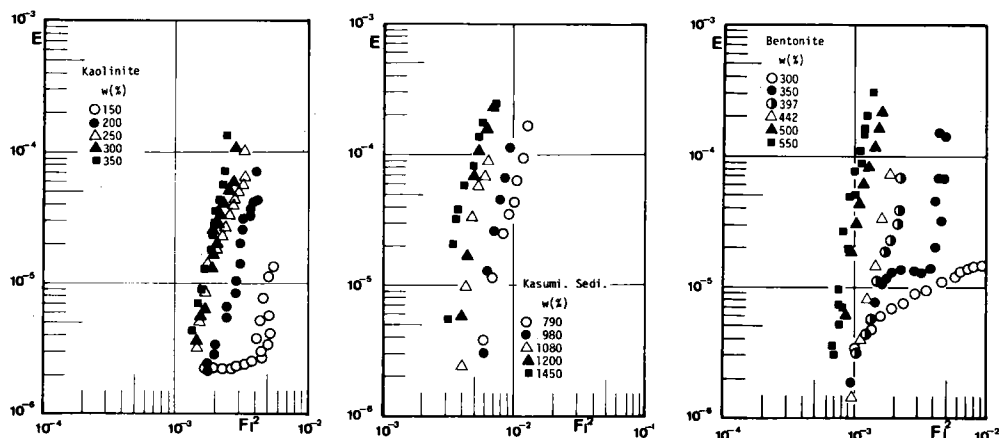


図 4-2 底泥の飛び出し量の連行係数表示 (I)

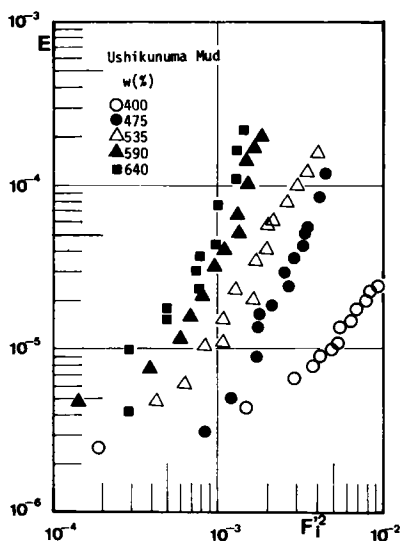


図 4-3 底泥の飛び出し量の連行係数表示 (II)

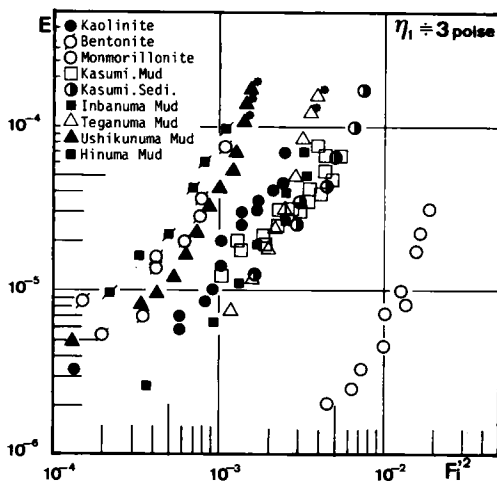


図 4-4 底泥の粘度 η_1 が等しい条件での連行係数 E と F_i^2 との関係

度 u_w で除した $P_m/(u_w \rho_l)$ で連行係数 E を定義した。横軸の Fi^2 はせん断応力 τ を代表値にとった内部フルード数の2乗値 $\tau/[(\rho_l - \rho)gh_u]$ である。ここで h_u は上層水深で今回は 5 cm である。連行係数 E と内部フルード数の2乗値 Fi^2 の関係を $E \propto Fi^{\alpha_1}$ で表現すれば、 $\alpha_1 = 8$ となり、通常の密度流界面で得られている $\alpha_1 = 3$ に比べてかなり大きい。また比例定数も底泥の含水比によって異なり普遍表示されない。

内部フルード数の2乗値として $(\tau - \tau_{cl})$ を代表値とした場合の結果の一例を図 4-3 に示す。横軸 Fi^2 は $Fi^2 = (\tau - \tau_{cl})/[(\rho_l - \rho)gh_u]$ で定義される値である。 E と Fi^2 の関係を $E \propto Fi^{\alpha_2}$ で表現すれば、 $\alpha_2 = 2 \sim 4$ となるが、比例定数はやはり含水比によって異なる。

Fi^2 および Fi^2 の分母にかかる h_u は代表的長さで、 h_u のほかに泥層厚さや代表粒径なども考えられるが、それによる結果は全てのデータが横軸方向に平行移動するだけであり、含水比の違いによる比例定数のバラツキは改善されない。図 4-4 は、各底泥の粘度 η_1 が 0.3 Pa·s に近い条件のものを選んで、 E と Fi^2 の関係を示したものである。粘度が同一でも、比例定数は底泥によって異なっており、これは底泥の粘度 η_1 が見掛け密度 ρ_l だけでは一義的に決まらない事実を反映している。

内部フルード数の分母は混合に抵抗する項と考えられるが、底泥の場合は粘性抵抗が支配的と考えられるので、 $(\rho_l - \rho)gh_u$ に換えて τ_{cl} を取り上げる。 E と $(\tau - \tau_{cl})/\tau_{cl}$ の関係をみたのが図 4-5 である。図 4-2 および図 4-3 に比べて含水比によるバラツキが改善されたが、それでも E と $(\tau - \tau_{cl})/\tau_{cl}$ とで P_m が規定できるまでには至らなかった。現象的にも、50 余りの実験ケースの中で、内部波が観察されたのは Na^+ -ベントナイトの 2 ケースのみで、河床自体の流動が観察されたのは、 Na^+ -ベントナイトの 4 ケースの他には $\eta_1 < 0.08$ Pa·s の条件を満たす 3 ケースのみであった。内部波が観察されないことが必ずしも連続体的な取り扱いが不適当ということにはならないが、少なくとも通常の連行係数表示では底泥の飛び出し量は規定できず、底泥の粘度や降伏値を含んだ形に改良する必要がある。

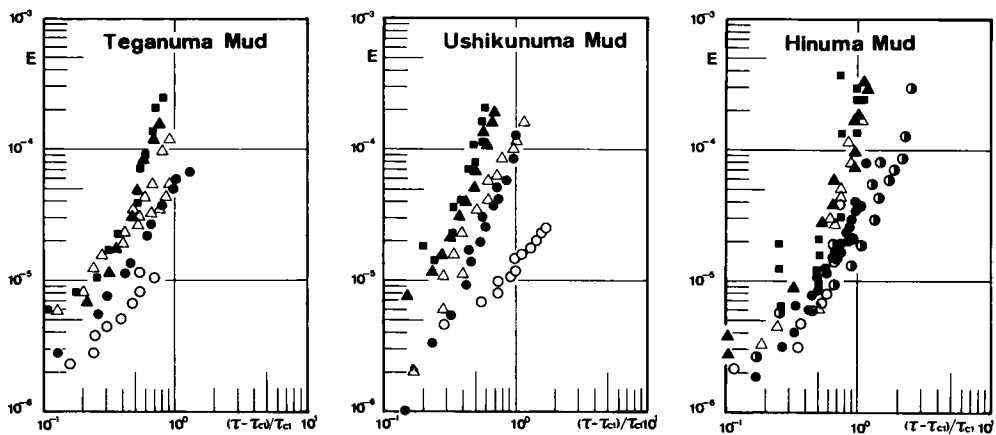


図 4-5 連行係数 E と $(\tau - \tau_{cl})/\tau_{cl}$ の関係

第 4.4 節 無次元飛び出し率

4.4.1 飛び出し率と掃流力に関する無次元量

底泥の飛び出し現象において、底泥を粒状体の集合とみて、まず砂粒の移動現象との類似点および相違点について考察する。砂粒の場合、流送される量は流砂量として評価されることが多く、流砂量式が数多く提案されている。流砂量はある断面を単位時間に通過する砂の量で、飛び出し率と移動距離 (step length) を掛け合わせたものに比例する量である。⁷⁾ 砂粒では step length が粒径の 100 倍程度と非常に短いために直ちに平衡状態に達し、局所洗濯などの場合を除いて、流砂量はその地点のせん断応力と結び付けられることが特徴である。

一方、底泥の場合、step length は非常に長くなり、日本の多くの実河川では平衡状態に達する前に流れが変化してしまう可能性が高い。また、湖沼などの場合には、むしろ浮遊時間 (duration time) を定義したほうがよいと思われる。そのため底泥の場合、平衡状態量としての流泥量より飛び出し率のほうが重要となる。

非粘着性の砂粒に対する飛び出し率の推定式としては、中川・辻本の式が知られている。自然砂 ($\sigma/\rho = 2.65$) に対する pick-up rate p_s の推定式は次式で与えられる。^{8), 9)}

$$p_s \sqrt{d/(\sigma/\rho - 1)g} = 0.03 \tau_* \{1 - (\tau_{*c}/\tau_*)\}^3 \quad (4-1)$$

ここで、 d は砂粒径、 τ_* は無次元掃流力 ($= \tau/\text{sgd}$, $s = \sigma - \rho$)、 τ_{*c} は無次元限界掃流力で 0.035 である。

底泥の飛び出し率についても式 (4-1) のような無次元推定式を求めることが目的である。そのための第一段階として、次元解析的考察によって実験結果の無次元表示を試みる。飛び出し量 P_m の無次元表示は、砂粒と同様に考えれば

$$P_{m*} = (A_2/A_3)(P_m/A_0 d_0)t_0 = p_m t_0 \quad (4-2)$$

となる。ここで、 A_2 および A_3 はそれぞれ粒子の面積および体積に関する形状係数、 ρ_0 は飛び出す際の代表的粒子の密度、 d_0 はその粒径である。また t_0 は基準時間、 p_m は単位時間当りに粒子が飛び出す確率で、次元は $[T^{-1}]$ である。

せん断応力の無次元表示には少し検討を要する。砂粒の無次元せん断応力 τ_* は τ/sgd で定義される。これは、砂粒の流送抵抗力が重力場因であるためである。底泥の場合、粘着力が移動抵抗として主要のものであるが、それをどのように表すかが問題となる。第 3 章で、底泥の場合には二つの限界状態を定義した。底泥の飛び出し率を考える際どちらの限界値を用いたらよいか問題となる。著者は、最終的には破壊限界 τ_{*2} という結論に至ったわけであるが、流れを平均量だけで評価すると、限界掃流力 τ_c を破壊限界 τ_{*2} で定義した場合、 $\tau < \tau_{*2}$ で底泥が飛び出すことになり一見したところ不自然である。現象的にも、流送限界 τ_{*1} のほうが砂粒の移動限界とも対応し、 $\tau < \tau_{*1}$ で $P_m = 0$ 、 $\tau > \tau_{*1}$ で P_m を定義するという

のは合理的に思われる。砂粒における流砂量式 q_B や pick-up rate p_S の推定式でも

$$q_B \text{ or } p_S \propto \tau^{n_1} (\tau - \tau_c)^{n_2} \quad (n_1, n_2 : \text{定数}) \quad (4-3)$$

なる表示がなされ、 q_B および p_S は $\tau > \tau_c$ で定義される。また従来の底泥の飛び出し率の実験結果も、式 (4-3) の形で整理されており、 p_m を $\tau > \tau_c$ で考えている。しかし、ここでは 3.5.4 で検討した理由に基づいて、底泥に関しては限界掃流力 τ_c として破壊限界 τ_{c2} を採用し、 τ / τ_{c2} なる無次元量を考えた。

4.4.2 基準時間

砂粒の離脱の研究では、基準時間として、Einstein¹⁰⁾ や辻本¹¹⁾ は粒子の沈降速度に関するものを、Paintel や早川は摩擦速度や局所流速で粒径分程度移動するのに要する時間を採用している。¹¹⁾ 前者は、基準時間を「流れによらぬ特性時間」と考えたのに対し、後者は「流れも含んだ砂粒の追従性を示す特性時間」と考えた。いずれにしても、水中における粒子の移動に関する「時定数」のような概念である。

前者の考え方に基づいて底泥の離脱に関する特性時間を次元解析的考察により評価すると

$$t_{01} = \nu_1 / \{(\rho_0 / \rho - 1)gd_0\} \quad (4-4)$$

となる。ここで、 t_{01} は基準時間、 $\nu_1 = \eta_1 / \rho_1$ および ρ_1 は底泥の見掛け密度である。 t_{01} は代表粒子が周辺から粘度 η_1 に比例する粘性抵抗を受けて沈降する際、粒径分沈降するのに要する時間に比例する量である。

一方、後者の立場に立って局所流速 u_d を含んだ特性時間 t_{02} を考えると、

$$t_{02} = (d_0 / u_d)(\eta_1 / \mu) \propto d_0 / u_0 \quad (4-5)$$

となる。式 (4-5) では、粒子移動速度 u_0 が $u_d \mu / \eta_1$ に比例すると仮定した。ここで u_d は粒子の代表的位置の局所流速である。

4.4.3 代表密度および代表粒径

図 4-6(a) は、代表密度と代表粒径の概念を示す。⁶⁾ d_m の粒子の幾つかが何等かの力で結合して、粒径 d_0 、密度 ρ_0 の粒状体として結合している。比較として、図 4-6(b) は連続体と考えた場合で、平均粒径 d_m 、真密度 σ の微粒子が分散しており、見掛けの密度が ρ_1 となる。いま、河床における代表粒子の充填構造を単純立方充填と仮定し、その間隙は水で満たされているとすると、 ρ_0 は

$$\rho_0 = (\rho_1 - \rho) / A_3 + \rho \quad (4-6)$$

で与えられる。式 (4-6) によれば、 ρ_0 は粒径に無関係に評価される。 A_3 は球形であれば π

1/6, 立方体であれば1でその場合 $\rho_0 = \rho_t$ となる。

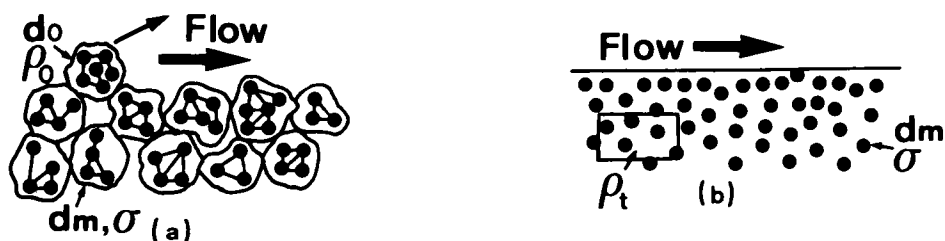


図 4-6 飛び出し時の底泥の代表密度 ρ_0 および代表粒径 d_0 のモデル

d_0 の評価については、次のように考えた。いま、体積 l^3 中の底泥粒子の実質体積 V_s は、次式で表される。

$$V_s = \rho l^3 / \{\rho + \sigma(w/100)\} \quad (4-7)$$

よって、 l^3 中に存在する平均粒径 d_m の底泥粒子の個数 n_d は、

$$n_d = (1/A_3)(l/d_m)^3 [\rho / \{\rho + \sigma(w/100)\}] \quad (4-8)$$

となる。しかし、粒径 d_m の粒子 n_d 個を単純立方充填すれば、図 4-7(a) のようになり、体積 l^3 を満たすことができない。そこで図 4-7(b) のように、 n_d 個の粒子で l^3 の体積を単純立方充填で満たすことができる粒径を求めて、これを代表粒径 d_0 とした。

$$d_0 = l(1/n_d)^{1/3} = [\{\rho + \sigma(w/100)\} / \rho]^{1/3} A_3^{1/3} d_m \quad (4-9)$$

この方法によれば、代表粒径に含水比、真密度および平均粒径の効果を評価したことになる。

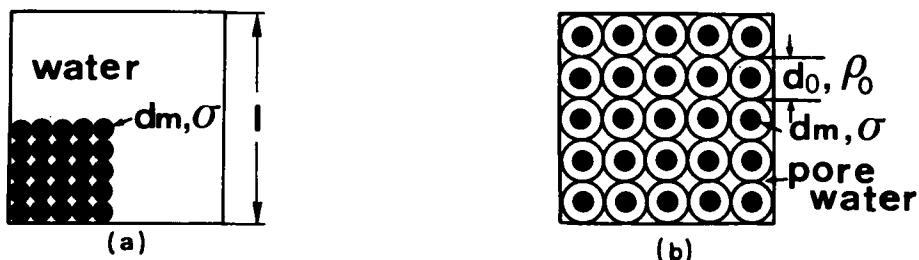


図 4-7 代表粒径 d_0 の概念図

4.4.4 飛び出し率の無次元表示

式 (4-2) に、 t_{01} および t_{02} を代入して次の無次元量を考える。

$$P_{w1} = P_m \eta_1 / \{ \rho_0 \rho_1 (\rho_0 / \rho - 1) g d_0^2 \} \propto P_m t_{01} \quad (4-10)$$

$$P_{w2} = P_m \eta_1 / (\rho_0 d_0 \tau) \propto P_m t_{02} \quad (4-11)$$

式 (4-11) においては、 $\tau \propto \mu (u_d/d_0)$ が成立するとした。実験値 P_m を式 (4-10) および式 (4-11) で無次元化し、 τ/τ_{c2} との関係を求めた。 ρ_0 、 d_0 の値はそれぞれ式 (4-6) および式 (4-9) で与えた。図 4-8 は P_{w1} と τ/τ_{c2} の関係の一例である。同一底泥でも含水比による違いが大きく、底泥の種類によりその違いはさらに大きくなっている。一方、 P_{w2} の場合には、同一底泥においては含水比によらずほぼ一つにまとまった。図 4-9 は第一底泥グループに属する底泥に対して各底泥ごとに得られた P_{w2} と τ/τ_{c2} の関係を両対数紙上で直線近似して示したものである。 P_{w2} と τ/τ_{c2} の関係を

$$P_{w2} = C_2 (\tau/\tau_{c2})^{\alpha_2} \quad (C_2, \alpha_2 : \text{実験定数}) \quad (4-12)$$

で表現すると、 C_2 および α_2 は両者とも多少のパラツキはあるが、底泥によらずほぼ一定値となる。即ち、特性時間として t_{02} を用いることにより、底泥の飛び出し率は含水比や底泥の種類に関係なく一義的に整理され、実験的には P_{w2} と τ/τ_{c2} によって規定された。

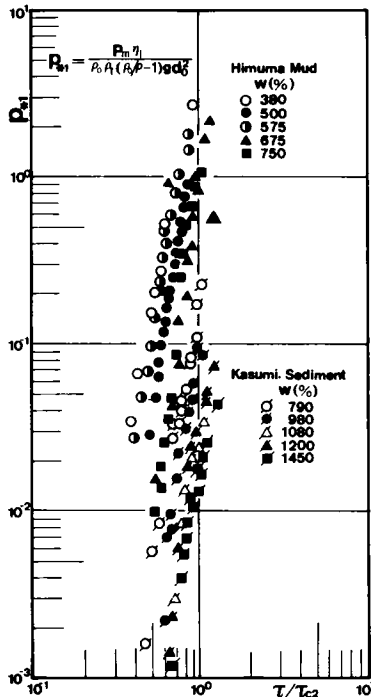


図 4-8 P_{w1} と τ/τ_{c2} の関係

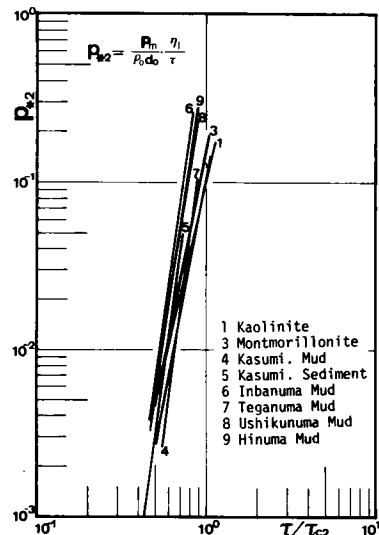


図 4-9 P_{w2} と τ/τ_{c2} の関係

第 4.5 節 飛び出し率に関する理論的考察

4.5.1 底泥粒子の運動方程式

4. 4 節で、粘度 η_1 が飛び出し率 p_m を支配する重要な因子であることがわかった。粘度は物質が流動したときに関与する量であるので、4. 4 節の結果は、底泥の飛び出しに対して、底泥粒子が静的な力の均衡が破れたとき瞬間的に動くという解析では不適当であり、粒子の離脱が時間のかかる現象であり、運動方程式に基づく評価が必要であることを示唆している。中川・辻本⁸⁾は、砂粒子に対する離脱率の推定式を、粒子の回転に関する運動方程式に基づいて求めている。砂粒の初期移動機構を転動離脱として捉え、回転に関する運動方程式から砂粒が転動離脱に要する時間 T_d を評価した。さらに、砂粒を移動させることができる流体力の持続時間 $p_0 \hat{t}_0$ を考え、その時間内に離脱する個数を $p_0 \hat{t}_0 / T_d$ で定義し、飛び出し率 p_s を推定した。ここで p_0 はせん断応力に変動を考え $\tau > \tau_c$ なる確率であり、 \hat{t}_0 は対象とする砂の初期移動を考える際の変動を捉える時間単位である。

底泥の飛び出し率を推定するにあたって、底泥を何等かの形状・大きさを持った粒子の集合体として捉えるならば、砂粒と同様の考え方が適用できる。相違点は、底泥の場合抵抗力が重力でなく粘着力であること、および高粘性のため慣性が無視でき移動直後に平衡速度に達すると考えられること、さらに 3. 5 節で示した理由により初期移動形態が転動離脱ではなく滑動離脱であることなどである。

さて、図 4-10 に示される状態の粒子 A が流れから力を受け、河床面に沿って滑動で離脱するものとする。粒子 A には、抗力 D と粘性抵抗力 R_v が作用すると考え、揚力と水中重量による抵抗力は無視する。粒子 A の流れ方向の運動方程式は次式で与えられるとする。

$$A_3(1+C_M)(\rho_0 - \rho)d_0^3(dv/dt) - k_3A_1\mu(u_d - u_c)d_0 + k_4A_1\eta vd_0 = 0 \quad (4-13)$$

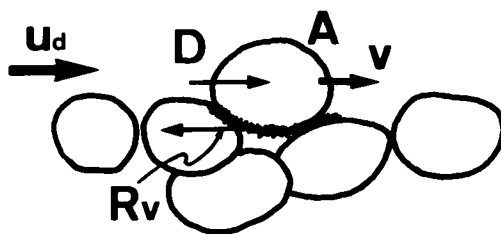


図 4-10 記号図

ここで、 A_3 は体積に関する形状係数、 A_1 は抗力および粘性抵抗力に関する形状係数、 C_M は付加質量係数、 d_0 および ρ_0 はそれぞれ離脱時の底泥の代表粒径および密度、 k_3 および k_4 は比例定数、 v は粒子速度、 u_d は粒子近傍の流れの速度、 u_c は限界流速、 η および μ はそれぞれ底泥および水の粘度である。左辺第一項は慣性項、第二項は抗力項、第三項は粘性抵抗力

項である。式 (4-13) を整理すると、

$$dv/dt + k_4 A_0 \eta v = k_3 A_0 \mu (u_d - u_c) \quad (4-14)$$

$$A_0 = (A_1/A_3)(1+C_M)(\rho_0 - \rho)d_0^2 \quad (4-15)$$

となる。これを解くと、

$$v/v_0 = \{1 - \exp(-k_4 A_0 \eta t)\} \quad (4-16)$$

が得られる。ここで v_0 は

$$v_0 = (k_3/k_4)(\mu/\eta)(u_d - u_c) \quad (4-17)$$

で与えられる平衡速度である。式 (4-16) より、粒子は移動開始後、急速に平衡速度に近づくことがわかる。 k_3 および k_4 の正確な値は不明であるが、流体力と粘性抵抗力が粒子の上下半分ずつに作用すると仮定して、 $k_3 = k_4 = 1/2$ とする。

4.5.2 底泥粒子の移動速度

初期移動のモデル化において、粒子の移動速度が平衡速度 v_0 で近似できるか否かを検討する。粒子が粒径分移動するのに要する時間に比べて、 $v/v_0 = 0.9$ になる時間が十分小さければ、 $v = v_0 = \text{const.}$ と見なしてよいであろう。式 (4-16) より、 v/v_0 は A_0 および η の値によって変化し、両数値が小さいほど $v/v_0 = 0.9$ となる時刻 t_p は大きくなる。そこで η の値は、流送実験における η_1 の下限値に近い $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ とした。 A_0 の値は底泥粒子を球形と仮定し、 ρ_0 および d_0 として表 3-3 と対応させて二つの条件について式 (4-15) より求めた。二つの組み合わせに対する A_0 の値と t_p の値を表 4-1 に示す。

表 4-1 底泥粒子が平衡速度に達する時間 t_p と粒径分移動するのに要する時間 T_d

| | ρ_0 (g/cm^3) | d_0 (μm) | $A_0 \times 10^3$ | $t_p \times 10^{-3}$ (sec) | $T_d \times 10^{-3}$ (sec) | T_d/t_p |
|---|--|----------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|
| ① | 2.3 | 20 | 2308 | 0.002 | 2.34 | 1670 |
| ② | 1.2 | 38 | 4155 | 0.001 | 6.33 | 6330 |

一方、式 (4-16) より底泥の移動距離は、

$$x_d = \int_0^t v dt = v_0 [t + \{\exp(-A_0 \eta t/2) - 1\}/(A_0 \eta/2)] \quad (4-18)$$

で与えられる。 $A_0 \eta t/2 = t_*$ として変形すると、

$$x_w = A_0 \pi x_d / (2v_0) - 1 = t_w + \exp(-t_w) \quad (4-19)$$

となる。図 4-11 は x_w と t_w の関係を示したものである。 $t_w \geq 3$ で $\exp(-t_w) \doteq 0$ となることがわかる。底泥粒子は、 v_0 が大きいほど d_0 だけ移動するのに要する時間 T_d が短くなるので、 u_d の最大値を考えれば T_d の最小値が評価できる。 $u_d \doteq U_m$ として、 $U_m = 0.6 \text{ m/s}$ とすれば、 $\pi_1 = 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ のとき、 $v_0 = 6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ となる。式 (4-19) に v_0 と A_0 を代入し、 $x_d = d_0$ として T_d を求め表 4-1 に示す。表 4-1 には T_d/t_p の値も示す。二つの条件とも $T_d/t_p \gg 1$ となり、底泥粒子の初期移動のモデル化に際しては、粒子は移動開始直後から平衡速度 v_0 で移動すると考えてよいことが明らかとなった。

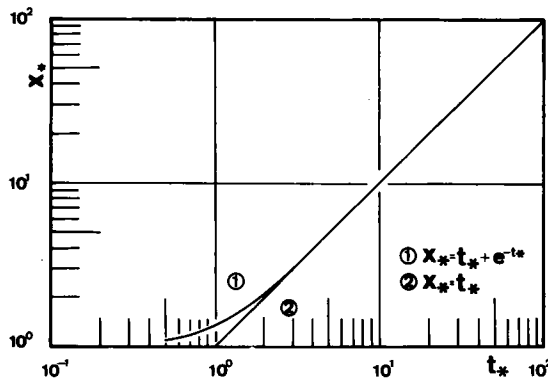


図 4-11 無次元移動距離 x_w と無次元時間 t_w の関係

4.5.3 無次元飛び出し率の定式化

底泥は式 (4-17) で表される平衡速度で河床から離脱するが、せん断応力は乱れによって変動している。底泥は高周波の変動に対しては応答せず、ある程度持続した力にのみ応答する。底泥についても砂粒の場合と同様に、初期移動を考える場合の変動を把える時間単位を考え、これを \hat{t}_0 とする。そして、 p_0 を $\tau > \tau_c$ の確率とすると、 $p_0 \hat{t}_0$ 時間ずつ持続して粒子を離脱させることができるせん断応力が作用すると考える。 $p_0 \hat{t}_0$ 中に底泥粒子が飛び出す個数は、底泥粒子の離脱時間を T_d とすれば、 $p_0 \hat{t}_0 / T_d$ で与えられる。したがって、単位時間当たりの離脱粒子個数を全体の時間に亘って考えると、結局飛び出し率 p_m は次式で求められる。

$$p_m = (p_0 \hat{t}_0 / T_d) (1 / \hat{t}_0) = p_0 / T_d \quad (4-20)$$

p_m の次元は $[T^{-1}]$ で、単位時間当たりに粒子が飛び出す確率である。 p_0 は無次元量である。 p_0 と T_d を評価できれば、飛び出し率 p_m が推定できることになる。まず底泥の離脱時間について考える。底泥の移動に伴う粒子の接触面積の減少は無視し、離脱する間の底泥粒子の粘度や移動速度の変化も考えない。底泥の離脱を底泥が $a_1 d_0$ だけ移動した状態と定義すると、

底泥粒子が離脱に要する時間は、

$$T_d = a_1 d_0 / u_0 = a_1 \eta / \{(u_d - u_c) \mu\} \quad (4-21)$$

で表される。ここで a_1 は定数である。底泥表面は水理学的滑面で、粘性底層内で次の関係が成立しているとする。

$$u_d = (\rho u_{*d}^2 / \mu) a_2 d_0 = a_2 d_0 (\tau / \mu) \quad (4-22)$$

$$u_c = (\rho u_{*c}^2 / \mu) a_2 d_0 = a_2 d_0 (\tau_c / \mu) \quad (4-23)$$

ここで、 a_2 は定数で $a_2 d_0$ は局所流速 u_d の作用高さを示す。一方、持続時間 $p_0 \hat{t}_0$ の間に作用する力は次のような条件付平均底面せん断応力に等しいと考えられる。

$$E[\tau \mid \tau > \tau_c]$$

よって、式 (4-21) は

$$T_d = (a_1 \eta / a_2) \{1 / (E[\tau \mid \tau > \tau_c] - \tau_c)\} \quad (4-24)$$

と変形される。なお式 (4-24) は底泥表面を粗面と考えても導かれる。その場合には、式 (4-13) の左辺第二項の抗力を $(u_{*d}^2 - u_{*c}^2)$ に比例するとし、 u/u_{*} の関係式としては粗面对数則を適用する。

次に底面せん断応力については、中川・辻本と同様に正規分布するものと仮定する。せん断応力 τ の確率密度関数を $p(\tau)$ とすると、

$$p(\tau) d\tau = \{1 / (\sqrt{2\pi} \sigma_1)\} \cdot \exp\{-(\tau - \bar{\tau})^2 / (2\sigma_1^2)\} d\tau \quad (4-25)$$

である。ここで $\bar{\tau}$ はせん断応力 τ の平均値、 σ_1 はその標準偏差である。いま $y = (\tau - \bar{\tau}) / \sigma_1$ とすると、

$$\Phi(y) = (1/\sqrt{2\pi}) \cdot \exp(-y^2/2) \quad (4-26)$$

このとき、 p_0 は

$$p_0 = \left\{ \int_{y_c}^{\infty} \Phi(y) dy \right\} / \left\{ \int_{-1/\delta_0}^{\infty} \Phi(y) dy \right\} \quad (4-27)$$

であり、

$$y_c = (\tau_c - \bar{\tau}) / \sigma_1 = (1/\delta_0) \{ (\tau_c / \bar{\tau}) - 1 \} \quad (4-28)$$

$$\delta_0 = \sigma_1 / \bar{\tau} \quad (4-29)$$

である。またこのとき $E[\tau | \tau > \tau_c]$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} E[\tau | \tau > \tau_c] &= \left\{ \int_{\tau_c}^{\infty} \tau p(\tau) d\tau \right\} / \left\{ \int_{\tau_c}^{\infty} p(\tau) d\tau \right\} \\ &= \left\{ \int_{y_c}^{\infty} (y \sigma_1 + \bar{\tau}) \Phi(y) dy \right\} / \left\{ \int_{y_c}^{\infty} \Phi(y) dy \right\} \\ &= \bar{\tau} (1 + \delta_0 y_s) \end{aligned} \quad (4-30)$$

ここで、

$$y_s = \left\{ \int_{y_c}^{\infty} y \Phi(y) dy \right\} / \left\{ \int_{y_c}^{\infty} \Phi(y) dy \right\} \doteq \Phi(y_c) / p_0 \quad (4-31)$$

が成立する。¹¹⁾ よって、ここで改めて $\tau = \bar{\tau}$ とすれば、結局

$$E[\tau | \tau > \tau_c] \doteq \bar{\tau} \{ 1 + \delta_0 \Phi(y_c) / p_0 \} \quad (4-32)$$

なる関係が得られる。式 (4-20) に式 (4-24)，式 (4-32) を代入すれば、

$$(a_1/a_2) (\eta p_m / \tau) \{ 1 + \delta_0 \Phi(y_c) / p_0 - \tau_c / \tau \}^{-1} = p_0 \quad (4-33)$$

となる。よって、無次元飛び出し率 p_{m*} は

$$p_{m*} = (\eta / \tau) p_m = (a_2/a_1) p_0 \{ 1 + \delta_0 \Phi(y_c) / p_0 - \tau_c / \tau \} \quad (4-34)$$

で与えられる。式 (4-34) が底泥の無次元飛び出し率 p_{m*} の推定式となる。いま、砂粒と同様に $\delta_0 = 0.5$ と仮定する。¹³⁾ 底面せん断応力に対する今回の仮定は、底泥表面が滑面の場合少し検討の余地が残る。滑面剪断乱流場でのせん断応力の分布や壁面近傍での圧力および流速の鉛直分布を対象とした研究に、Corcos¹⁴⁾，Willmarth et al.¹⁵⁾，Grass¹⁶⁾ および Blinko et al.¹⁷⁾ の実験的研究がある。しかし、これらの研究では、滑面乱流場でのせん断応力分布に対して決定的な結論を引き出すに至っていない。これらの研究結果を総合的に判断する限りでは、今回の仮定でも大きな誤りはないと思われる。定数 a_1 および a_2 の値については、底泥粒子が粒径分移動した時を離脱と考えて $a_1 = 1$ と仮定し、 a_2 は 0.75 を用いることにする。この値を用いて p_{m*} と τ / τ_c との関係を求めたのが図 4-12 である。図 4-12 によれば $\tau / \tau_c < 1$ で p_{m*} は τ / τ_c に対して急勾配で増加しているが、 $\tau / \tau_c > 1$ ではその勾配は急激に低下してゆき、 $p_{m*} = 0.75$ に漸近してゆく。これは、 $\tau \gg \tau_c$ において

$$p_0 \div 1, \quad E[\tau | \tau > \tau_c] - \tau_c \div \tau \quad (4-35)$$

となるためである。これは、 $\tau \gg \tau_c$ では $p_m \propto \tau/\eta$ なることを示し、粘性流体のクエット流れ $u = (\tau/\eta)y$ に対応するものである。

4.5.4 無次元飛び出し率の推定式と実験結果との比較

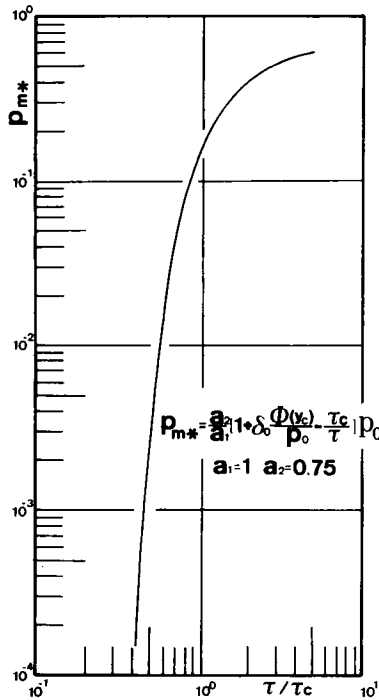


図 4-12 底泥の無次元飛び出し率 p_{m*} の推定式および曲線

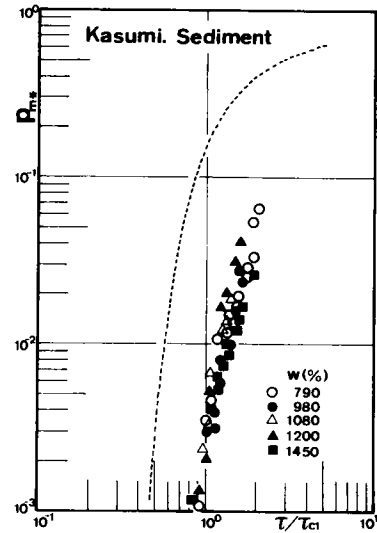


図 4-13 p_{m*} と τ/τ_{c1} の関係

ここまでの議論においては、限界掃流力 τ_c として何を用いるべきかを言及しなかった。式 (4-34) の誘導の過程では、 τ_c は流送限界 τ_{c1} でも破壊限界 τ_{c2} でも特に支障はない。せん断応力の変動を考慮したことにより、平均底面せん断応力が限界掃流力以下でも、底泥粒子の飛び出しは定義可能となった。 τ_{c1} と τ_{c2} のどちらを τ_c として用いるべきかは、実験結果との対応の良さが一つの目安になる。流送実験で求められる飛び出し量 p_m と無次元飛び出し率 p_{m*} との間には、次式の関係が成立する。

$$p_{m*} = (\eta/\tau) p_m = (A_2/A_3) (\eta/\tau) \{p_m/(\rho_0 d_0)\} \quad (4-36)$$

底泥粒子を球形と仮定し ($A_3 = \pi/6$, $A_2 = \pi/4$), さらに粘度 η として η_1 を用いて飛び出し量 P_m の実験値から無次元飛び出し率 p_{m*} を計算し, τ/τ_{c1} および τ/τ_{c2} との関係求めた。図 4-13 は p_{m*} と τ/τ_{c1} の関係の一例であり, 図 4-14 は p_{m*} と τ/τ_{c2} の関係の一例である。この際, ρ_0 および d_0 の値としてはそれぞれ式 (4-6), 式 (4-9) で与えた。図中の破線は式 (4-34) で与えられる p_{m*} の推定曲線である。 $\tau_c = \tau_{c1}$ とした図 4-13 では, $\tau/\tau_{c1} > 1$ において推定曲線と実験結果とで勾配が全く異なり, さらに値そのものも推定値が 1 オーダー以上大きくなっている。一方, $\tau_c = \tau_{c2}$ とした図 4-14 では, 推定曲線と実験結果との整合性が良い。他の底泥についても同様な結果となった。以上のことから, $\tau_c = \tau_{c2}$ とすれば,

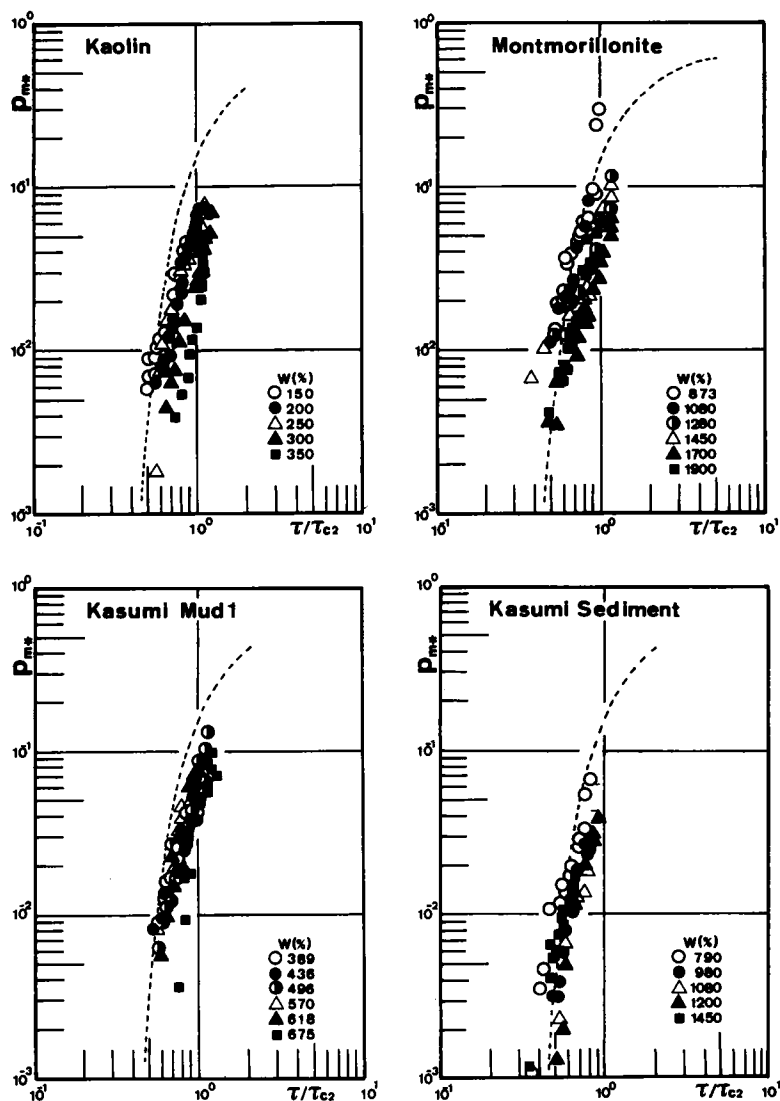


図 4-14 底泥の pick-up rate の推定式の実験的検証 (p_{m*} と τ/τ_{c2} の関係)

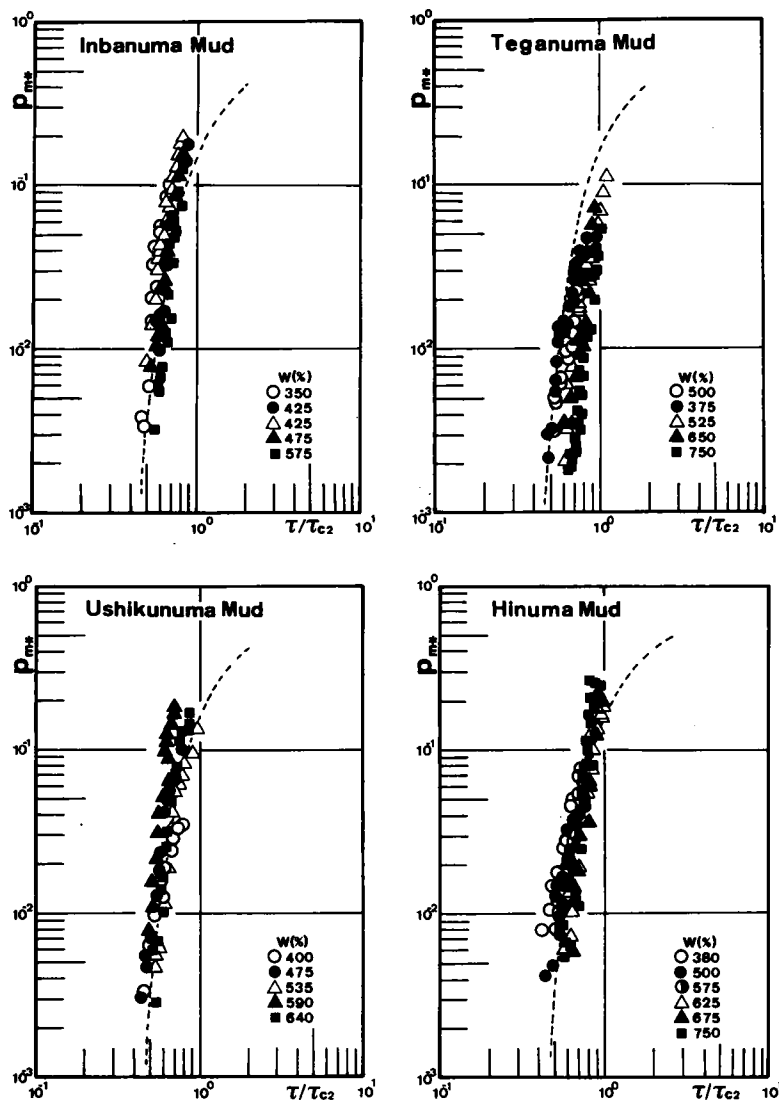


図 4-14 (つづき)

式 (4-34) は意味の不明な実験定数を導入することなく底泥の飛び出し率を推定できることがわかる。また、図 4-14 の結果は図 4-9 の実験的事実の合理的説明にもなっている。

底泥の無次元飛び出し率の推定式の特徴は、砂粒の場合には p_{sw} が $\tau/\tau_c > 1$ の範囲で定義されるのに対して、底泥の場合には p_{ms} は $\tau/\tau_c < 1$ の範囲で定義されることである。底泥の場合、 $\tau > \tau_{c2}$ の状態では、底泥は表層のみならず下層も流動することになり、河床が破壊される。そうすると流れも河床に平行に作用しなくなり局所的な付加せん断応力が大きくなって、底泥粒子の浮上・流送機構はここで展開した移動機構とは全く異なったものになる。

このような状態では、無次元飛び出し率の推定式として式(4-34)を適用することはできない。式(4-34)が適用される状況というのは、底泥が全体としては流動化しておらず、ある底泥粒子に $\tau/\tau_{c2} > 1$ なる流体力が離脱時間より長く作用した時、その粒子が飛び出すというものである。破壊限界 τ_{c2} は式(3-4)に示したように、底泥の降伏値 τ_{y1} にほぼ一致する値であり、 τ/τ_{c2} と捉えることは底泥の限界掃流力が何によって規定されているかという問題を研究する立場からも都合が良い。3.5.4においても、底泥の限界掃流力として破壊限界 τ_{c2} を考えるのが妥当であると結論付けたが、飛び出し率に関する考察においてもこの結論が正しいことが示された。この考えをさらに進めて限界掃流力 τ_c を降伏値 τ_{y1} に直接結び付けることが考えられ、このほうが限界掃流力 τ_c の意味はさらに明確になる。ただし、3.4.1に述べた理由で破壊限界 τ_{c2} は降伏値 τ_{y1} より若干小さい値となる。 $\tau_{c2} < \tau_{y1}$ になる他の理由としては、粘着力が作用している部分は τ_{y1} の強度があるとしても、表層ではその部分の面積が小さくなるために平均的にならしたせん断応力値としては、小さくなることも考えられる。いずれにしても、 $\tau_{c2} = k_2 \tau_{y1}$ と表現したとき $k_2 < 1$ と考えられ、 k_2 の合理的な評価が今後検討すべき問題となる。

ここで展開した初期移動モデルは、その他にも検討すべき過程を含んでいる。離脱過程の粒子の接触面積の減少の問題もその一つである。さらに、定数 δ_0 、 k_3 、 k_4 、 a_1 および a_2 などの値も検討の余地が残る。それにも関わらず式(4-34)は、底泥の種類のみならず含水比によっても異なる飛び出し率とせん断応力の関係を、第一底泥グループに関しては総て包括しており、このモデルで第一底泥グループに属する底泥の初期移動現象を十分記述し得るものと考えられる。

このモデルは、降伏値を持つ底泥、即ち第一底泥グループの底泥のみに適用できるものであり、第二底泥グループに属する底泥には適用出来ない。さらに、降伏値 τ_{y1} が大きすぎると適用できない。降伏値が大きくなると、底泥層内部は全く流動しないのにも関わらず、底泥表層から微細粒子がわずかに巻き上がる現象が観察された。これは、界面付近のごく薄い層で濃度勾配が形成されており、層内では底泥濃度が低く降伏値が小さくなっているため、この層内の底泥粒子が飛び出したものと考えられる。この現象は、 $\tau_{y1} > 2 \text{ N/m}^2$ の実験で観察された。このように考えると式(4-34)が適用できる範囲は、第一底泥グループに属する底泥の内、 τ_{y1} が $0.1 \sim 2 \text{ N/m}^2$ を満たす含水比条件の場合に限定される。しかし、湖沼やエスチャー等堆積している底泥のほとんどが第一底泥グループに属すると考えられ、さらに現地で堆積している底泥の表層部は上記の含水比条件を満足していることなどから、式(4-34)の適用範囲はかなり広いと考えられる。

4.5.5 無次元飛び出し率による流送限界の再評価

3.5.4でも若干ふれたが、流送限界 τ_{c1} は現象論的な定義に基づく限界値であって、力学的釣り合い条件で決められる静的なものではない。そのため、流送限界は飛び出し率との関連で評価すべきものと考えられる。流送限界は現象的には底泥の飛び出し量が無視できるせん断応力の上限值と考えられるが、この「無視できる程度の飛び出し量」をいかに客観的に評価するかが問題となる。一つの方法は、飛び出し量 $P_m = \text{const.}$ で評価する方法である。著者が実験で求めた流送限界はこの方法によるものであり、おおむね $P_m = 3 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ が

基準値となっていることがわかった。この方法で求めた流送限界 τ_{c1} と降伏値 τ_{y1} には式 (3-3) の関係があるが、両者の次元が合わなかった。もう一つの方法は、無次元飛び出し率 $p_{ms} = \text{const.}$ で評価する方法である。この基準によって求められる流送限界 τ_{c1} の値は、 p_{ms} と τ / τ_{c2} の間に一義的な関係があるので、 $\tau_{c1} / \tau_{c2} = \text{const.}$ なる関係が成立することになる。今回の実験結果を参照して、 $p_{ms} = 3 \times 10^{-3}$ が適当と思われる。このとき $\tau_{c1} / \tau_{c2} = 0.5$ となる。この場合、 $\tau_{c1} = 0.5k_2 \tau_{y1}$ となり、降伏値 τ_{y1} とも結び付けられるのですっきりとした定義となる。

第 4.6 節 研究成果と問題点

これまでの考察により、底泥の浮上・流送特性の基本的性質は、ほぼ明らかにされたと考えられる。底泥の二つの限界掃流力 τ_{c1} および τ_{c2} は降伏値 τ_{y1} と結び付けられ、さらに無次元飛び出し率 p_{ms} は降伏値 τ_{y1} と粘度 η_1 の概念を導入することによって式 (4-34) のように求められた。また、無次元飛び出し率を用いて新しい流送限界 τ_{c1} の基準を提案した。式 (4-34) については、他の研究者の実験データとの比較が望ましいが、それらの実験データについては粘度 η_1 や降伏値 τ_{y1} の値が不明なので比較出来なかった。

限界掃流力や飛び出し量に対して、 η_1 や τ_{y1} という流動特性量が支配的因子となることが明らかになったが、 η_1 および τ_{y1} 自体は理論的に求めることは現時点では不可能である。また、 η_1 および τ_{y1} を求めるためには第 5 章で述べるような機能を持つ測定機器が必要で、一般的には η_1 および τ_{y1} を求めるのは困難である。しかし、 η_1 および τ_{y1} は間接的な方法である程度推定できる。第 5 章において、粘度 η_1 と最終沈降体積比 ϕ_{∞} の関係を図 5-13 に、また粘度 η_1 と降伏値 τ_{y1} の関係を図 5-14 に示す。よって限界掃流力や飛び出し率を知りたいある含水比条件の底泥に対して、それと同じ含水比を初期条件として沈降実験を行って最終沈降体積比 ϕ_{∞} を求めれば、図 5-13 および図 5-14 から粘度 η_1 や降伏値 τ_{y1} が推定でき、最終的に限界掃流力 τ_{c1} および τ_{c2} も無次元飛び出し率 p_{ms} も推定可能となる。

飛び出し時の底泥粒子の代表的密度 ρ_0 および代表的粒径 d_0 の決定も今後に残された課題である。これらの量は粒子の水中での挙動を考察する場合にも重要となる。3.2.2 でも述べたように、露ヶ浦沈降物の離脱・浮上後の粒子の平均粒径 d_m' が表 2-4 に示した平均粒径 d_m の 1~2 倍程度であったこと、Matsuo & Kamon の研究¹⁸⁾ でも自然堆積状態のヘドロのベッドの単位が $10 \sim 20 \mu\text{m}$ であり、定方向径の比が 1 前後という結果を得ていることから、式 (4-6) および式 (4-9) による ρ_0 、 d_0 の評価はあながち不適当ではないと思われる。

第二底泥グループの Na^+ -ベントナイトに対しては、この粘土には降伏値 τ_{y1} が存在しないので、今回展開したモデルでは無次元飛び出し率 p_{ms} を評価できない。含水比が低い場合の飛び出し量 P_m の特性は澤井⁴⁾ の結果と一致しているが、高含水比では低含水比とは違った特性となった。第二底泥グループに属する底泥の飛び出し量の特性については限界掃流力を含めて今後の課題である。

第 4.7 節 結 論

本章では、底泥の飛び出し率に関して実験的・理論的に論じた。先ず始めに、飛び出し量の連続体的な取り扱いと粒状体の取り扱いの良否を検討した。その結果、底泥の飛び出し量に関しては、後者の取り扱いが適当であることを示し、次元解析的考察により粘度 η_1 が重要な因子となることを示した。その結果に基づき、底泥粒子の離脱過程において粘度に比例する粘性抵抗が作用するとして、粒子の滑動に関する運動方程式を導いた。そして、底泥の粘度が高いため移動粒子は直ちに平衡速度に達すると考えて、底泥粒子の離脱に要する時間を評価した。さらに、流体力の変動を正規分布と仮定し、初期移動に支配的な乱れの周期に基づく流体力の作用持続時間を考えて、無次元飛び出し率の推定式を導いた。このモデルは、底泥の種類、含水比の影響を包括し、実験結果とも良好に一致した。また、この推定式を基に新しい流送限界の定義を提案した。それは、無次元飛び出し率の一定値（著者は $p_{ms} = 3 \times 10^{-3}$ を提案する）を限界の判定基準とするものであり、この方法によれば、流送限界も値こそ異なるが、降伏値 τ_{y1} に比例することになる。この定義は理論的にも明解で客観性もあると考えられる。

参考文献

- 1) 村岡浩爾(1974)：流れによる底泥浮上と水質との関連，第18回土木学会水理講演会講演論文集，181-186。
- 2) Partheniades, E. (1965) : Erosion and deposition of cohesive soils, Proc. A.S.C.E., 91, HY1, 105-139.
- 3) 楠田哲也・海田輝之・栗谷陽一・石原達弘(1982)：底泥の巻き上げと沈降に関する基礎的研究(II)，第18回土木学会衛生工学研究討論会講演概要集，152-158。
- 4) 澤井健二(1977)：粘着性流路床の変動機構に関する土砂水理学的研究，京都大学学位論文。
- 5) 細井由彦(1981)：底泥浮上モデルに関する一考察，土木学会第36回年次学術講演会講演概要集第II部，1-2。
- 6) 大坪国順・村岡浩爾(1982)：底泥の飛び出し量に関する研究，第26回土木学会水理講演会講演論文集，141-146。
- 7) 例えば土木学会編(1971)：水理公式集 昭和46年改訂版，土木学会。
- 8) 中川博次・辻本哲郎(1975)：水流による砂礫の移動機構に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第244号，71-80。
- 9) 辻本哲郎(1978)：掃流過程の確率モデルとその移動床問題への応用，京都大学学位論文。
- 10) Einstein, H. A. (1942) : Formula for the transportation of bed load, Trans. A.S.C.E., Paper No. 2140, 561-597.
- 11) 辻本哲郎(1975)：砂礫の移動に伴う河床波の発達に関する基礎的研究，京都大学修士論文。
- 12) 大坪国順(1983)：底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究，国立公害研究所研究報

告, 第42号。

- 13) Einstein, H.A. & E.A.El-Sami(1949): Hydrodynamic forces on a rough wall, Review of Modern Physics, 21, 520-524.
- 14) Corcos, G.M.(1964): The structure of turbulent pressure field in boundary layer flows, J.Fluid Mech., vol.18, 353-378.
- 15) Willmarth, W.W. & C.E.Wooldridge(1962): Measurements of the fluctuating pressure at the wall beneath a thick turbulent boundary layer, J.Fluid Mech., vol.14, 187-210.
- 16) Grass, G.M.(1971): Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries, J.Fluid Mech., vol.50, 233-260.
- 17) Blinco, P.H. & D.B.Simons(1974): Characteristics of turbulent boundary shear stress, Proc.A.S.C.E., APRIL, EM2, 203-220.
- 18) Matsuo, S. & M.Kamon(1977): Microscopic study on deformation and strength characteristics of clay soil, Proc.9th.Int.Conf.SM.& F.E., 1, 201-204.

第5章 底泥の流動曲線

第5.1節 概 説

第3章において、流送形態の特徴をもとに底泥を二つのグループに分類した。そして二つの底泥グループには、沈降形態や流動曲線においても明確な違いが現れるとして、表 3-2にそれらの特徴を対比させて整理した。さらに、限界掃流力と粘度および降伏値との間の実験式も二つの底泥グループでは異なることを示した。第4章において誘導された底泥の飛び出し率の推定式も、第一グループの底泥にのみ適用されるものであった。このように、底泥の浮上現象を取り扱う場合には、底泥を十把一絡げに同一視することはできず、まず沈降形態なり流動曲線なりの特徴から対象とする底泥がどのグループに属するかを見極めることが必要である。

この章では、底泥の流動曲線について、その特徴を二つの底泥グループと対応づけて述べる。流動曲線とは「せん断力とずり速度の関係を示す曲線」のことであり、その特徴を流動特性という。粘度や降伏値は物質の流動特性を表現する指標の一つである。底泥はミクロレベルでみれば、多くの間隙を持つ粒子の集合体であるが、底泥のマクロ的な性質を表わす流動特性には、ミクロレベルでの性質が強く反映されていると考えられる。

底泥の流動特性は、含水比によって変化する。一般に、濃度が十分希薄で、粒子間の相互作用が無視できる場合には、粘性係数がEinsteinの粘度式で与えられるニュートン流動となる。しかし、濃度が高くなると非ニュートン流動となり降伏値を持つようになる。非ニュートン流体の流動曲線を求めるためには、ずり速度を連続的に変えられる粘度計が必要である。従来、この目的でストーマー式等の回転粘度計やコーンプレート型粘度計、水平管型粘度計などが用いられてきた。しかし、これらの測定器では、ずり速度と剪断応力の関係は離散的にしか求められず、ずり速度の小さな領域での精度が悪い。そのため、粘土ペーストや土壌ペーストの流動曲線に対しては、高ずり速度領域の流動曲線を直線近似し、ビンガム流体としての粘度、降伏値が求められてきた。著者は、底泥の浮上現象には微小ずり速度領域の流動特性が深く関与しているという観点に立ち、ずり速度が連続的に可変な高精度の二重円筒式回転粘度計を用いて、ずり速度がゼロ付近の領域に注目して粘度と降伏値を求めた。

種々の底泥について、含水比を変化させて流動曲線を求めた。底泥は、チクソトロピックな物質なので、粘度計のローター回転数の変化率などの測定条件を一定とした。また、カオリナイトなどの粘土に対しては、吸着陽イオンの影響を調べた。さらに、一部の底泥については、泥温の影響を検討した。実験の結果、底泥の流動曲線は二つの典型的なものに大別され、その分類が流送形態による分類と一致することを示し、支配因子が何であるかを検討した。さらに、二つのタイプの流動曲線に対して粘度および降伏値を定義して、それらを規定する因子についても検討した。

第5.2節 実験条件および方法

5.2.1 粘度計

流動特性の測定には、内筒が回転するサーレ型二重円筒式回転粘度計を用いた。回転粘度計の特徴は、操作が簡便で、試料が少なく済むことである。しかし、今回用いた装置の最大の特徴は、ずり速度の連続可変条件を任意に設定できることである。図 5-1は、本装置が操作可能な回転数と時間の関係である。

図中、 T_1 は測定開始からローターが始動するまでの時間、 T_2 は最大回転数に至るまでの時間および T_3 は最大回転数の状態にある時間である。 N_{max} はローターの最大回転数(rpm)である。

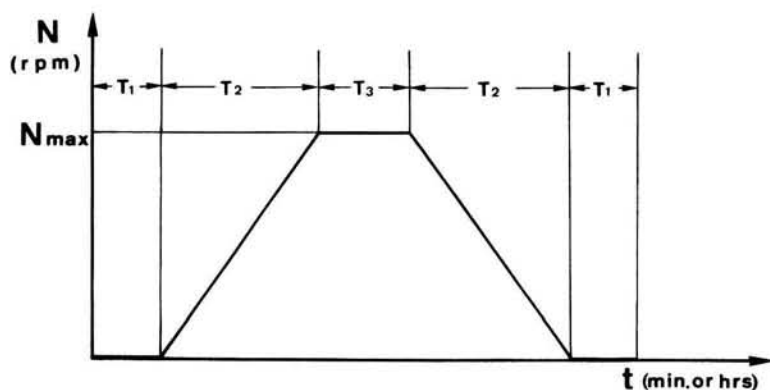


図 5-1 粘度計のローター回転数の時間変化曲線

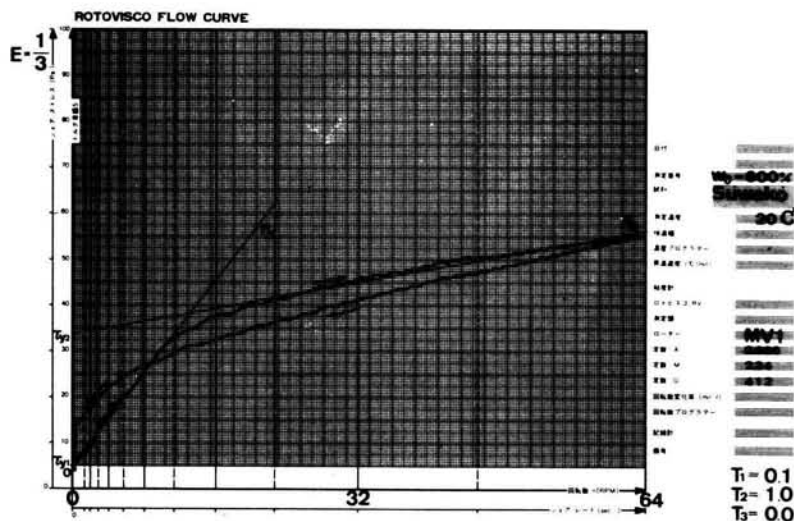


図 5-2 底泥の流動曲線の測定例

図 5-2は、測定結果の一例である。条件は、含水比 600%および泥温 20℃の諏訪湖泥である。降伏値の存在と、 $N = 10\text{rpm}$ で曲線が屈曲しているのがわかる。また、すり速度の上昇と下降とでは曲線が異なっている。これは、底泥のチクソトロピックな性質に因る。

5.2.2 測定方法

各濃度に調整した試料を、外筒に所定量（ローターAの場合：40ml，ローターBの場合：9ml）を入れ、泥温を一定にして測定する。実験目的ごとの実験条件を、表 5-1 に示す。各実験ごとに、原則として 3回の測定を行った。Series Iは各種底泥の含水比による変化を、Series IIは吸着陽イオンの影響を、Series IIIは泥温の影響を調べる実験である。

表 5-1 流動曲線の測定条件

| Series | Materials | Mud Temperature °C | T_1 (min) | T_2 (min) | T_3 (min) | N_{max} (r.p.m) |
|--------|---|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| I | Clays Muds etc. | 20 | 0.1 | 1 | 0 | 64 |
| II | Kaolinite Bentonite Montmorillonite | 20 | 0.1 | 1 | 0 | 64 |
| III | Montmorillonite Kasumi. Mud 1 | 5, 10 20, 30 | 0.1 | 1 | 0 | 64 |

5.2.3 底泥の種類

表 5-2 底泥の種類と流動曲線の分類

| | w (%) | 10^2 | 10^3 | 10^4 |
|-------------------------|-------|--------|--------|-----------|
| 1 Kaolinite | | ←A→ | A | E E E E E |
| 3 Kaolinite + Starch | | ←C→ | D | |
| 7 Kaolinite + Agar | | ←A→ | | |
| 10 Bentonite | | ←B→ | D | D D D D |
| 12 Bentonite + Starch | | ←B→ | | |
| 17 Bentonite + Agar | | ←B→ | | |
| 19 Montmorillonite | | | ←A→ | A A A A E |
| 20 Kasumi Mud 1 | | ←A→ | A | E E E E E |
| 25 Kasumi Mud 6 | | ←A→ | | |
| 26 Phosphorus of Kasumi | | | ←A→ | |
| 27 Inbanuma Mud | | ←A→ | A | E E E E E |
| 28 Teganuma Mud | | ←A→ | | E E E E E |
| 29 Ushikunuma Mud | | ←A→ | | E E E E E |
| 30 Hinuma Mud | | ←A→ | | E E E E E |
| 31 Suwako Mud | | ←A→ | | E E E E E |
| 32 Yunoko Mud | | | ←A→ | |

流動曲線を求めた底泥の試料と測定した含水比の範囲を、表 5-2 に示す。含水比は対数目盛であり、表中の記号は後述する流動曲線の型を示す。底泥はすべて蒸留水を用いて所定の含水比に調整した。底泥試料番号 3, 7, 12, 17 の粘土の有機物含有率はすべて 10% である。

第 5.3 節 流動曲線の特徴

図 5-3 は、測定された流動曲線のうち、ずり速度 $d\gamma/dt$ が増加してゆく場合の典型的なものの模式図である。底泥の流送特性との関連性から、底泥が静止状態から流動状態へ移行する場合の流動曲線が重要と考えられるので、ずり速度の増加する場合を研究対象に選んだ。

Type A が最もよく測定された型である。今回の粘度計では、二重円筒の外筒と内筒の半径の比が 1.05 なので、底泥がビンガム流体であれば、ビンガム流体の理論¹⁾より $\tau_{y2}/\tau_{y1} = 1.05$ となるべきであるが、測定結果では τ_{y2}/τ_{y1} は 10 前後の値となり、底泥を $\tau_{yB} = \tau_{y2}$ および $\eta_B = \eta_2$ のビンガム流体として取り扱うことは不適当と考えられる。

Type A の流動曲線の特徴は、降伏値の存在と、流動曲線が或るずり速度 $\dot{\gamma}_A$ で急に折れ曲がることである。そのため Type A の流動曲線はのずり速度 $d\gamma/dt$ の範囲によって二つの関係式で表すのが適当と考えられる。(図 5-3 (A) 参照)

$$d\gamma/dt = (\tau - \tau_{y1})/\eta_1 \qquad d\gamma/dt \leq \dot{\gamma}_A \qquad (5-1a)$$

$$d\gamma/dt = (\tau - \tau_{y2})/\eta_2 \qquad d\gamma/dt > \dot{\gamma}_A \qquad (5-1b)$$

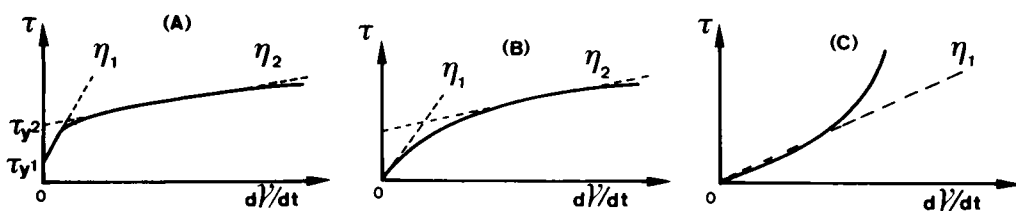


図 5-3 代表的な流動曲線および粘度と降伏値の定義

$\dot{\gamma}_A$ の値は 2~40 (1/s) であり、含水比の小さな試料ほど $\dot{\gamma}_A$ の値は大きくなる傾向があった。Type B の流動曲線は、本来ベキ法則が成立するものであるが、便宜上、図 5-3 (B) に示すように η_1 および η_2 を定義した。この場合 τ_{y1} は定義できない。Type C は $d\gamma/dt$ の増加と共にせん断応力が急激に増加するもので、ダイレタント流体と呼ばれる。このような特性を示す物質は少なく、今回の実験でも澱粉含有カオリナイトの低含水比の場合のみに見られた。Type C については、図 5-3 (C) に示すように η_1 を定義した。

第 5.4 節 流動特性の実験結果

5.4.1 底泥の種類の影響

各底泥の流動曲線は表 5-2 に示したように分類された。表中 A, B, C はそれぞれ図 5-3 の Type A, B, C の流動曲線に対応する。D はニュートン流体を, E は含水比が高くなって $\tau_{y1} = 0$ および $\eta_1 \div \eta_2$ となるが, チキソトロピー性を持ちニュートン流体には分類できないものである。表中, 矢印で示される範囲は, 流送実験を行った含水比範囲を示す。

表 5-2 から, 底泥の流動曲線は二つのグループに大別され, その区分は流送形態の場合と一致することがわかった。すなわち, Type A の流動曲線は第一底泥グループの底泥に現れた。Type B の流動曲線は第二底泥グループの底泥に現れた。澱粉含有カオリナイトはどちらのグループにも分類されず, $w < 90\%$ ではダイレタント流体となり, $w > 120\%$ ではニュートン流体となった。この場合沈降形態もこれに対応し, $w < 90\%$ では沈降面が, 一方 $w > 120\%$ では沈積面が現れた。第一底泥グループの底泥は $w > 2000\%$ では, E 型となりチキソトロピー性は保存される。第二底泥グループの底泥は高含水比ではニュートン流体となった。

5.4.2 含水比の影響

図 5-4 は, 図 5-3 で定義された粘度 η_1 と含水比 w との関係を両対数紙に示したもので

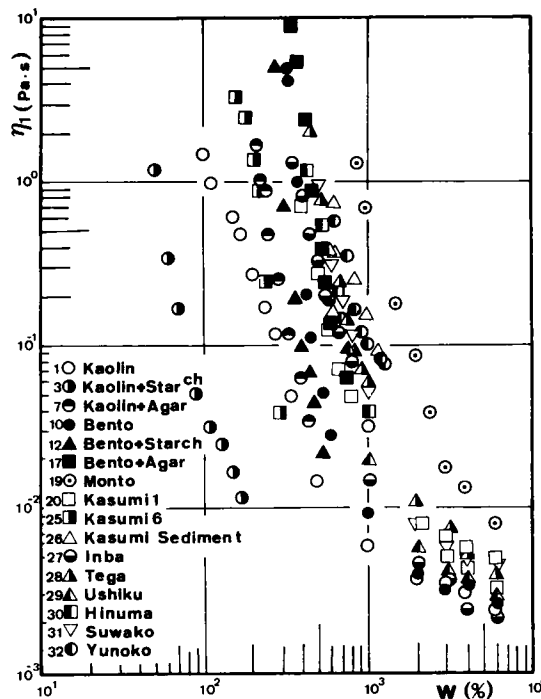


図 5-4 粘度 η_1 と含水比 w の関係

ある。各底泥とも、含水比の増加に伴い粘度 η_1 は減少する。同一含水比でも、底泥によって η_1 の値に大きな差が現れる。カオリナイトおよびベントナイトとも同一含水比条件での η_1 の値は、澱粉含有により減少し寒天含有によっては増加する。霞ヶ浦の底泥では、粘度 η_1 の大きさは沈降物 > Mud 1 > Mud 6 の順となっている。現地泥では、湯ノ瀧泥 > 霞ヶ浦沈降物 > 手賀沼泥 > 諏訪湖泥 > 霞ヶ浦泥 > 印旛沼泥の順で、同一含水比条件における粘度 η_1 の値が大きい。全般的な傾向としては、液性限界値が大きい底泥ほど同一含水比条件での η_1 の値は大きい。また、 η_1 の大きな底泥ほど、含水比の増加に伴う η_1 の減少の割合が少ない傾向も認められる。

図 5-5 はずり速度の大きな領域に適用できる粘度 η_2 と含水比 w の関係である。含水比に対する傾向は、粘度 η_1 の場合と同様である。 η_2 は η_1 の 10分の 1 程度の値となっている。図 5-5 には、大垣ら³⁾、須藤ら⁴⁾ および安富ら⁵⁾ の結果も併示してある。その結果を見ると大垣ら、須藤らおよび安富らが測定した粘度は、今回定義した粘度 η_2 に対応していることがわかる。

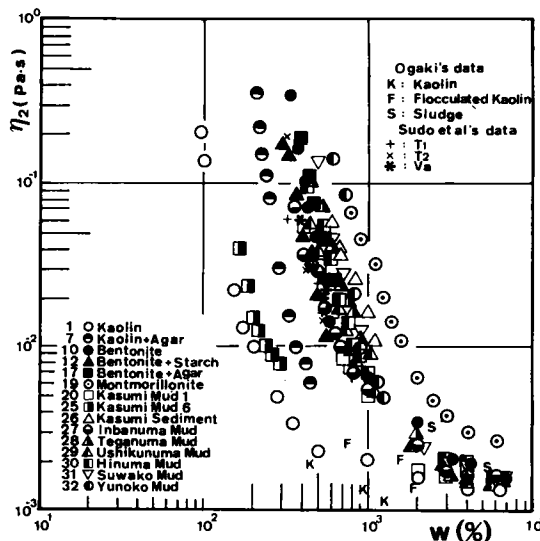


図 5-5 粘度 η_2 と含水比 w の関係

図 5-6 および図 5-7 は、それぞれ降伏値 τ_{y1} および τ_{y2} と含水比 w の関係である。ほとんどの底泥において τ_{y1} は τ_{y2} の 10分の 1 程度の値となる。降伏値も、粘度の場合と同様に、含水比が高くなると低下する。両図には、大垣らおよび安富らの結果も示した。大垣らの求めた降伏値は τ_{y2} に対応し、安富らの求めた降伏値は τ_{y1} に対応することがわかる。

ここで、大垣ら、須藤らおよび安富らが測定した粘度や降伏値と、今回定義した粘度 η_1 および η_2 や降伏値 τ_{y1} および τ_{y2} との対応を整理しておくことにする。大垣らの測定した粘度は η_2 に、また降伏値は τ_{y2} に対応すると考えられる。須藤らは、 $\phi < \phi_0$ では降伏値はその値が小さいとして無視して粘度のみを測定した。一方、安富らは $\phi > \phi_0$ では降伏値

は求めたが粘度はチクソトロピー性が著しいとして求めていない。須藤らの求めた $\phi < \phi_0$ での粘度は η_2 に、安富らの求めた $\phi > \phi_0$ での降伏値は τ_{y1} に対応すると考えられる。須藤らは ϕ_0 を懸濁体がニュートン流動となりうる最高体積濃度と定義している。しかし、今回の測定では、須藤らが与えた ϕ_0 以下の濃度条件でも Type Aの流動曲線が現れ、 η_1 および τ_{y1} が求められた。

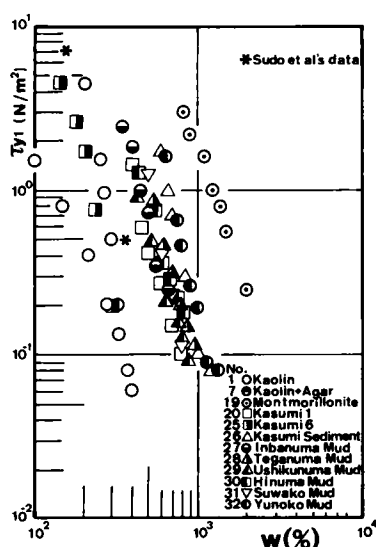


図 5-6 降伏値 τ_{y1} と含水比 w の関係

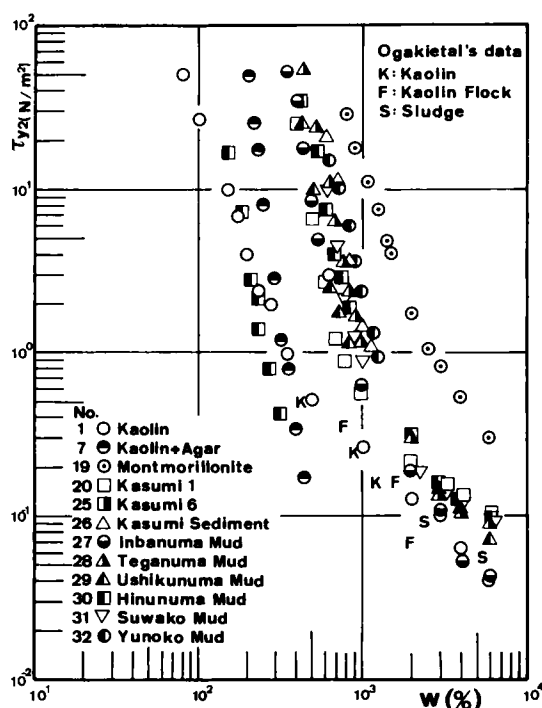


図 5-7 降伏値 τ_{y2} と含水比 w の関係

5.4.3 吸着陽イオンの影響

粘土に吸着している陽イオンの種類と、粘土の流動特性との関係を明らかにすることは、第3章の表 3-2の内容を裏付ける上でも意義のあることである。実験に用いた試料については、次章の第6.5節で詳しく述べるが、カオリナイトおよびモンモリロナイトの吸着陽イオンを Na^+ に、ベントナイトの吸着陽イオンを Ca^{2+} に置換したものである。

含水比が100~350%の範囲のカオリナイトの流動曲線は、吸着陽イオンが Ca^{2+} 、 Al^{3+} から Na^+ に変化することによって、Type AからType Bに（ニュートン流体も含む）に変化した。含水比が300~600%のベントナイトでは、吸着陽イオンが Na^+ から Ca^{2+} に変化することによって、流動曲線はType BからType Aに変化した。モンモリロナイトの場合、吸着陽イオンの H^+ から Na^+ への置換率が10数%と十分でなかったため、流動曲線のType AからType Bへの変換は完全ではなく、Type Aの特徴が残ったものとなった。以上のことから、吸着陽イオンの種類によって、流送形態のみならず流動曲線も大きく影響されることがわかった。主な吸着陽

イオンが Ca^{2+} , Al^{3+} および H^{+} の場合には Type A の、一方、 Na^{+} および Li^{+} のなどの場合には Type B の流動曲線となることが考えられる。この事実は、表 3-2 に分類した二つの底泥グループの結特性が吸着陽イオンにより決定づけられる、という考え方を支持するものである。

図 5-8 および 図 5-9 はそれぞれ吸着陽イオンの置換前後の粘度 η_1 および η_2 と含水比 w との関係である。カオリナイトは、吸着陽イオンが Na^{+} に置換されたことにより、 η_1 および η_2 が著しく低下した。ベントナイトは、流動曲線自体が置換前後で異種なものとなり、単純な比較は難しいが、今回の実験範囲内では、含水比が 700% 程度までは Ca^{2+} -ベントナイトのほうが小さく、含水比の増加と共に Na^{+} -ベントナイトに等しくなるか、逆に上回る傾向が認められる。モンモリロナイトはカオリナイトとは異なり、吸着陽イオンが Na^{+} に置換されたことにより、粘度 η_1 および η_2 が増大した。但し、含水比の増加と共に粘度の値は急激に低下し、 $w = 3000\%$ 程度で置換前の値に等しくなる。この結果は、須藤らの実験結果とも一致している。また、Workentin et al.⁶⁾ の粘土の剪断強さの実験結果でも、剪断強さは Na^{+} -モンモリロナイト $>$ Ca^{2+} -モンモリロナイトとなっている。

カオリナイトとモンモリロナイトでは吸着陽イオンの種類と粘度との関係が逆の結果となったが、その理由としては次のことが考えられる。せん断や流動に対しては、粒子間の引力のみならず斥力も抵抗力として作用する。土粒子は斥力により反発しあうので、斥力が抵抗に寄与するのは矛盾に思えるが、斥力が土粒子の配向に対して大きな抵抗力を示す場合があ

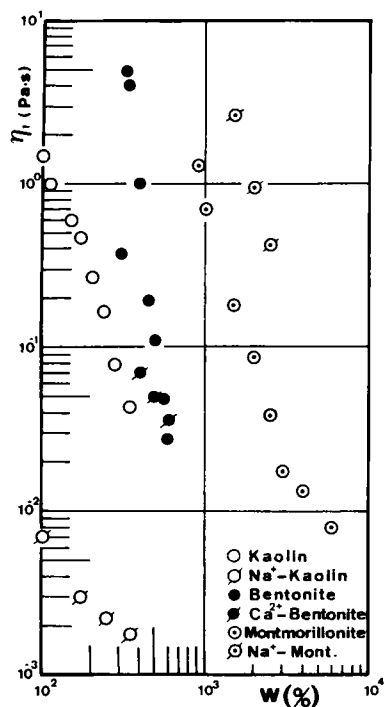


図 5-8 粘度 η_1 に及ぼす吸着陽イオンの影響

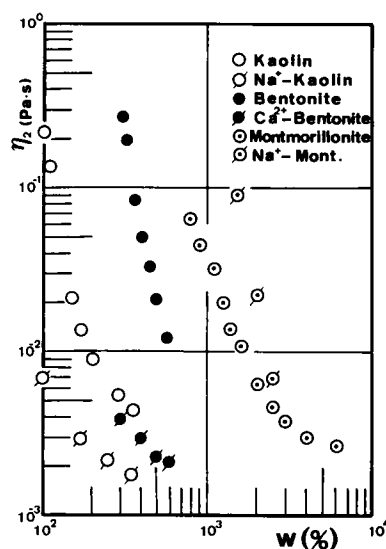


図 5-9 粘度 η_2 に及ぼす吸着陽イオンの影響

る。この抵抗力は配向抵抗力と呼ばれ、含水比が低くなるほど大きくなる性質のものであり、或る含水比以下ではこれが支配的な抵抗力となる。このような状態では、斥力の大きな土粒子ほどせん断強さや粘度は大きい。逆に含水比が高くなると、配向抵抗力は急激に減少し、粒子間引力による抵抗が支配的となる。この状態では、凝集しやすい土粒子ほどせん断抵抗や粘度が大きくなる。 Na^+ -粘土と Ca^{2+} -粘土では、前者が分散しやすく後者が凝集しやすいことはよく知られている。モンモリロナイトは高膨潤粘土であり、このような粘土では配向抵抗力が支配的となる含水比が高く、2000~3000% である。そのため通常の含水比では、 Na^+ -モンモリロナイトのほうが Ca^{2+} -モンモリロナイトより粘度が大きい。一方、カオリナイトは低膨潤粘土であり、含水比が 50%以下でないと配向抵抗力は生じない。そのため 100~350%の含水比では、 Ca^{2+} -カオリナイトのほうが Na^+ -カオリナイトより粘度が大きくなった。50%以下の含水比では、 Na^+ -カオリナイトの強度が急激に増すことも実験的に確認した。

5.4.4 泥温の影響

現地での底泥の温度は、気温の影響を受けて変動している。岩熊⁷⁾によって測定された曙ヶ浦高浜入（水深：2.2m）における底泥温度の鉛直方向分布の周年変動によれば、底泥表層では、3.4℃~29.3℃ までの振幅で泥温が変動していることがわかる。そのため流送特性を考察するにあたっては、泥温の影響を検討しておく必要があり、まず関連の深い流動特性について泥温の影響を検討した。実験条件は 5.2.2 に示した。実験中、室温も泥温に合わせた。図 5-10 は各温度に対する粘度 η_1 と含水比 w との関係である。また、図 5-11 は相対粘度 η_1/μ と含水比 w との関係である。結果にバラツキはあるが、粘度 η_1 は泥温に対する特定の傾向が認められない。また、相対粘度は、同一含水比条件において泥温が低いものほど小さく

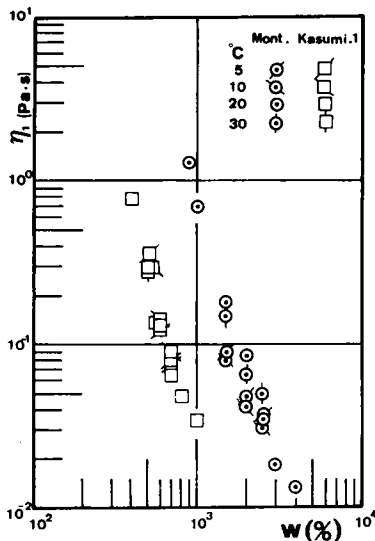


図 5-10 粘度 η_1 と含水比の関係に及ぼす泥温の影響

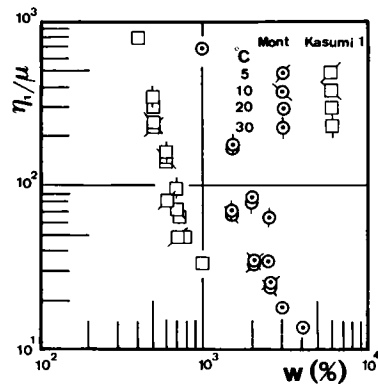


図 5-11 相対粘度 η_1/μ と含水比に及ぼす泥温の影響

なっている。このことは、底泥の粘度が、底泥中に含まれている水の温度による粘度変化に追従しなかったことを示している。

以上の結果から、今回測定した含水比および泥温の条件下では、粘度に及ぼす泥温の影響は無視できること、さらに水の粘性の温度による変化も底泥の粘度 η_1 には影響しないことがわかった。しかし、さらに高い含水比条件や泥温が60℃以上では、底泥懸濁体の粘度等に泥温の影響が現れることが大垣ら³⁾ によって明らかにされている。

第 5.5 節 底泥の粘度と降伏値

5.5.1 底泥の粘度

比較的高い濃度の懸濁液の粘度式としては、森・乙竹の半理論式⁸⁾ がある。これは、粒子表面間距離という概念を用いて、粒子中心間に作用する剪断応力（懸濁全体の粘度が関与する）と粒子表面間に存在する溶媒に作用する剪断応力（溶媒の粘度のみが関与する）が、近似的に等しいとして求められたものである。

$$\eta_r = [1 + (d_m S_r / 2) \{1 / (1/\phi - 1/\phi_c)\}] \mu \quad (5-2)$$

ここに、 η_r は懸濁液の粘度、 μ は水の粘度、 d_m は平均粒径、 S_r は単位体積当りの粒子の比表面面積、 ϕ は固体粒子の体積濃度、 ϕ_c は連続的かつ安定な剪断変形を与えうる体積濃度の上限値である。球形粒子では、粒径分布に関係なく $(d_m S_r) / 2 = 3$ となる。また、等粒径球形粒子の最疎充填状態を最高体積濃度 ϕ_c とすれば、 $\phi_c = 0.52$ となる。これらの数値を式 (5-2) に代入すれば

$$\eta_r = \{1 + 3 / (1/\phi - 1/0.52)\} \mu \quad (5-3)$$

となる。森・乙竹は、式 (5-3) は等粒径球形粒子の懸濁液について実験結果とよく一致すると報告している。粒径分布が存在すると ϕ_c の値が変化するが、この値は、 $1/\eta_{sp} (\eta_{sp} = \eta_r / \mu - 1)$ と $1/\phi$ の関係を示すグラフにおいて、 $1/\phi$ 軸との交点として実験的に求めることができるとした。森・乙竹によれば、 ϕ_c はニュートン流動を呈する上限の体積濃度と捉えられているので、森・乙竹の半理論式は、ニュートン流体を対象にして導かれたものである。

土壌懸濁液の粘度についても、ニュートン流動となる濃度条件で、式 (5-2) が適合することが須藤ら⁴⁾ によって報告されている。この場合 ϕ_c の値としては、近似的には沈降体積比 ϕ_{∞} が利用できるとしている。しかし、 ϕ_{∞} の値は懸濁液の初期含水比や初期高さの条件によって変化するにも関わらず、どのような条件で求めた ϕ_{∞} を用いるかが言及されていない。

大垣らは ϕ_c の値としては 0.52 で一定と仮定し、 ϕ の値として見掛けの体積分率 ϕ' を用いた。この見掛けの体積分率 ϕ' は一種の有効体積濃度で、懸濁液中での個々の粒子が実質粒径よりかなり大きな粒径として互いに作用しあっている、という考え方が基本となっている。具体的には、見掛けの大きさをもつ粒子群は、最終沈降状態では最疎充填構造で堆積してお

り、その体積の 0.52 倍が見掛けの粒子群が沈定体積に占める割合となると仮定して、 ϕ' の値を懸濁液の最終沈降体積分率 ϕ_{∞} の 0.52 倍で定義した。その結果、ビンガム流体に対しても式 (5-3) が適用できるとしている。粒径分布が存在しても常に $\phi_c = 0.52$ という仮定は、森・乙竹の実験結果からも不自然であるし、 ϕ' を求める際の仮定にも根拠がない。それにも関わらず大垣らの整理結果は、実用上十分有効なものである。

5.4.2 で述べたように、大垣らの測定した粘度はここでは η_2 に対応するので、 η_2 と ϕ_{∞} ($= H_{\infty}/H_0$) の関係について、大垣らの整理方法をふまえて考察することにする。ここで、 H_{∞} は沈降高さ、 H_0 は初期沈降高さである。式 (5-2) において、 ϕ として大垣らと同様 $\phi_{\infty} \phi_c$ を考える。よって式 (5-2) は

$$\begin{aligned}\eta_2 &= \{1 + (d_m S_r / 2) [1 / \{1 / (\phi_{\infty} \phi_c) - 1 / \phi_c\}]\} \mu \\ &= [1 + (d_m S_r / 2) \phi_c \{1 / (1 / \phi_{\infty} - 1)\}] \mu\end{aligned}\quad (5-4)$$

となる。ここで $d_m S_r / 2 = 3$ 、 $\phi_c = 0.52$ とすれば、大垣らの提案式³⁾となる。図 5-12 は各種底泥における η_2 と ϕ_{∞} の実験結果である。

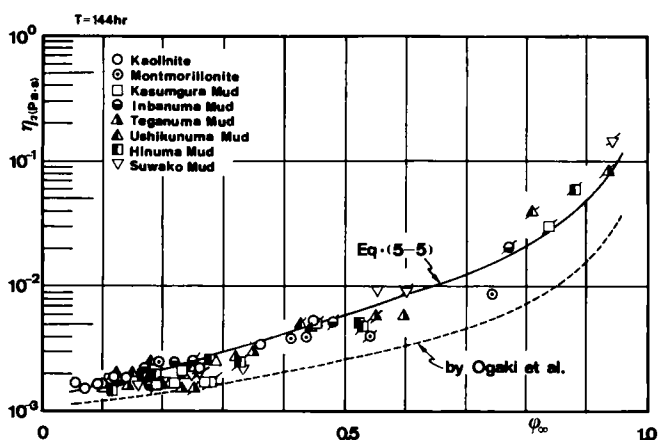


図 5-12 最終沈降体積比 ϕ_{∞} ($= H_{\infty}/H_0$) と粘度 η_2 の関係

図中の破線が大垣らの提案式である。 $(d_m S_r / 2) \phi_c = 5$ とおくと式 (5-4) は

$$\eta_2 = \eta_r = [1 + 5 / (1 / \phi_{\infty} - 1)] \mu \quad (5-5)$$

となり、この式 (5-5) は図中の実線で示される。 $(d_m S_r / 2) \phi_c = 5$ となる根拠は何もないが、底泥などの土粒子は最疎充填より密に充填しているためであろう。これには土粒子の形状等が深く関与していると考えられるが、詳しいことは不明である。実用上は式 (5-5) で η_2 と

ϕ_{∞} の関係が与えられる。なお $\phi_{\infty} (= H_{\infty}/H_0)$ を求める実験では、内径が 60mm で、長さが 230mm および 115mm の二種類の沈降筒を用いた。

図 5-13 は粘度 η_1 と $\phi_{\infty} (= H_{\infty}/H_0)$ の関係である。この場合も η_2 と同様、実験的には η_1 は ϕ_{∞} によって規定できるようである。しかし、底泥が粘度 η_1 を示す含水比状態では、底泥粒子は何らかの構造によって繋がっていると考えられる。式 (5-2) が想定している状態とは、見掛け粒子にせよ実質粒子にせよ、それらがバラバラになっている状態であるので、式 (5-2) の形を η_1 に適用するのは問題があると思われる。現状では図 5-13 の関係を理論的に説明する手段をもたないので、実用面を考えて実験式のみを提示するに留める。

$$\begin{aligned} \log \eta_1 &= 3.85 \phi_{\infty} - 3.6 & 0.5 < \phi_{\infty} \leq 0.95 \\ \log \eta_1 &= 2.30 \phi_{\infty} - 2.8 & 0.05 \leq \phi_{\infty} \leq 0.5 \end{aligned} \quad (5-6)$$

ここで η_1 は Pa·s の単位であり、 ϕ_{∞} は無次元である。

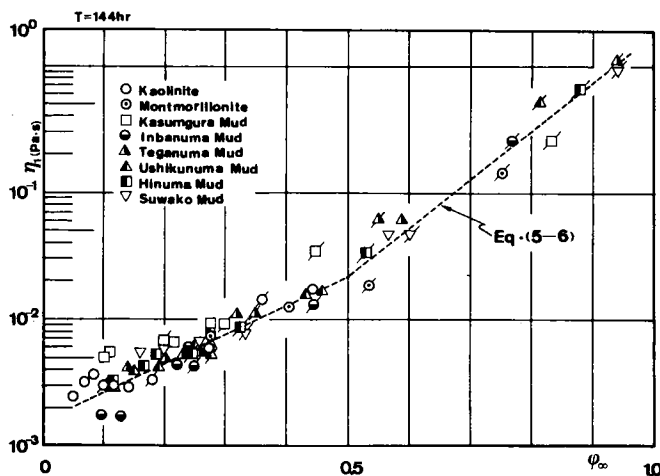


図 5-13 最終沈降体積比 $\phi_{\infty} (= H_{\infty}/H_0)$ と粘度 η_1 の関係

5.5.2 底泥の降伏値

土壌ペーストの降伏値に関しては、安富・須藤⁵⁾の実験式がある。

$$\tau_y = A\phi \exp [\phi - \phi_c] \quad (5-7)$$

ここで、 $A\phi$ は物質によって決まる定数、 ϕ は土壌ペーストの体積濃度、 ϕ_c はニュートン流動を呈しうる最高体積濃度で、沈降体積濃度 ϕ_0 で与えられている。5.5.1でもふれたが ϕ_c

を求める実験条件が曖昧なのでこの点が問題である。安富・須藤⁵¹の降伏値は今回の定義によれば τ_{y1} に対応するが、 A_{ϕ} が普遍定数でないので、 τ_y は体積濃度 ϕ によって一義的に決まらない。大垣ら³¹は、降伏値 τ_y は最終沈降体積比 ϕ_{∞} ではなく、懸濁液中の固相の乾燥重量 W_s によって一義的に決まるとした。乾燥重量は土粒子の密度が同じであれば、含水比と1対1に対応するので、大垣らの結論は降伏値は底泥の種類によらず底泥懸濁液の初期含水比 w_0 のみによって決まるということである。大垣らの求めた降伏値はビンガム降伏値で、今回の定義によれば τ_{y2} に対応すると考えられるが、今回の実験では τ_{y2} は初期含水比 w_0 が同じでも底泥の種類によって異なる結果となった。

図 5-14 は降伏値 τ_{y1} と粘度 η_1 の関係を示したものである。若干のバラツキはあるが、

$$\tau_{y1} = A_{\eta} \eta_1^{\alpha_1} \quad (A_{\eta} = 1.5, \alpha_1 = 0.93) \quad (5-8)$$

の関係が認められる。図 5-13で η_1 と ϕ_{∞} とに一義的な関係が認められたが、 τ_{y1} も底泥によらず ϕ_{∞} と一義的な関係があることになる。Michaels & Bogler^{91,101}も、堆積構造が同種の物質の場合には物質の種類によらず τ_{y1} と ϕ_{∞} に一定の関係を得たと報告している。

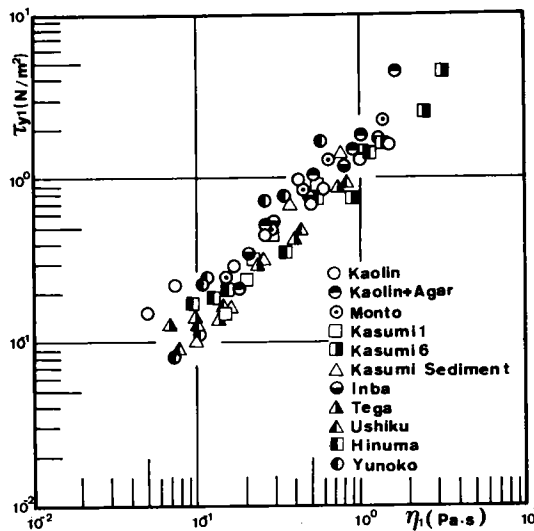


図 5-14 粘度 η_1 と降伏値 τ_{y1} の関係

上記のことから、底泥の流動特性を代表する粘度と降伏値には密接な関係があり、両者の発生機構は同じ起源と考えられる。降伏値 τ_{y1} と粘度 η_1 が共に最終沈降体積比 ϕ_{∞} と結び付くという実験事実は、 ϕ_{∞} が懸濁液中の粒子の有効濃度（換言すれば、自由水の割合）の指標であることを示している。 ϕ_{∞} が等しい場合に、底泥はその種類・粒度分布・粒子形状および比重等に左右されず、同一の粘度と降伏値を持つものと考えられる。最終沈降体積比・粘度および降伏値などの総量は、粘土鉱物の性質、有機物や膠結物質による結合作用、吸着陽

イオンの種類や濃度および粒子レベルでの吸引・反発作用などが相互に複雑に影響し合った結果、マクロ的な性質として派生したものであり、これらの力を理論的に導くことは現状では不可能である。

第 5.6 節 他の物性量との関連

底泥の流動特性と液性限界値や粒度構成などとの関連性についても少しふれる。含水比が同じ条件では、液性限界値が大きい底泥ほど η_1 , η_2 , η_{y1} および η_{y2} の値は全て大きくなり、 ϕ_{∞} も大きくなる傾向がある。Workentin et al.¹¹⁾ が吸着陽イオンによるコンシステンシーの変化を調べた結果¹¹⁾ では、カオリナイトの場合は液性限界値の大きさが Ca^{2+} -カオリナイト > Na^+ -カオリナイトとなり、モンモリロナイトの場合はそれが Na^+ -モンモリロナイト > Ca^{2+} -モンモリロナイトとなっている。この結果は著者によっても確認された。また図 5-8 の粘度の結果とも良く対応する。

一方、今回の実験範囲では、流動特性に粒度構成の影響は顕著に現れなかった。これは、対象とした底泥の粒子が、ほとんど粘土とシルトによる粒度構成であったことも一因であろう。しかし、今回の結果は、このような粒径範囲の底泥では、表面力を支配している因子が流動特性を支配しているということを、間接的に裏付けていると考えられる。

第 5.7 節 結 論

本章では、底泥の流動特性について主に実験的研究を行った。底泥はチクソトロピー性を持つ物質であるので、微小ずり速度からの連続的な流動曲線が必要である。底泥の流動曲線にも流送形態のグループ分けに呼応して二つの異なった型が現れた。第一底泥グループの流動曲線の特徴は、降伏値の存在と、流動曲線の急激な折れ曲がりである。この流動曲線においては、ずり速度の微小な範囲で降伏値 τ_{y1} と粘度 η_1 を定義した。第二底泥グループの流動曲線の特徴は、降伏値がなく、流動曲線がベキ乗則に乗ることである。この場合には、ずり速度の微小な範囲で便宜的に粘度 η_1 を定義した。液性限界が高い底泥ほど、同一含水比での粘度や降伏値の値は大きくなる傾向がある。また、吸着陽イオンの置換により、沈降形態の変化に呼応して流動曲線も変化した。今回の含水比の条件の範囲内では、底泥の粘度には水の粘度の影響はないこと、さらに 5~30℃ の泥温変化の影響もないことが明らかとなった。

本章の後半では、粘度 η_1 と降伏値 τ_{y1} と最終沈降体積比 ϕ_{∞} の間の関係を検討し、実験的には最終沈降体積比によって粘度と降伏値が規定できることを示した。この実験事実に対する理論的実証は現状では不可能であるが、定性的には次のように考えられる。最終沈降体積比は、懸濁液中の粒子間の影響範囲を示す粒子の有効体積分率の指標と考えられ、この値が等しい場合に底泥はその種類・粒度・形状・比重等に左右されることなく、同一の流動特性を呈すると考えられる。

参考文献

- 1) 岡 小天(1974): 物理科学選書 7 レオロジー, 裳華房.
- 2) 大坪国順・村岡浩爾(1981): 底泥の物性と限界掃流力の関連について, 第25回土木学会水理講演会講演論文集, 73-78.
- 3) 大垣真一郎・松尾友矩(1977): 高濃度懸濁液の流動特性について, 土木学会論文報告集, 第210号, 21-23.
- 4) 須藤清次・安富六郎(1961): 土壌ペーストの流動(I), 農業土木研究別冊, 第2号, 71-74.
- 5) 安富六郎・須藤清次(1962): 土壌ペーストの流動(II), 農業土木研究別冊, 第3号, 41-45.
- 6) Workentin, B.P and Yong, R.N. (1962): Shear strength of montmorillinite and halosite related to interparticle forces, Clays Miner., 9, 210-218.
- 7) 岩熊敏夫(1981): 霞ヶ浦高浜入における底泥温度の年変動と熱収支, 国立公害研究所研究報告, 第22号, 55-61.
- 8) 森 芳郎・乙竹 直(1956): 懸濁液の粘度について, 化学工学, 20, (9), 16-22.
- 9) Michaels, A.S. and Bogler J.C.B. (1962): Settling rates and sediment volumes of flocculated kaolinite suspensions, I & EC Fundamentals, 1, (1), 24-33.
- 10) Michaels, A.S. and Bogler J.C.B. (1962): The plastic flow behavior of flocculated kaolinite suspensions, I & EC Fundamentals, 1, (3), 153-162.
- 11) Yong, R.N. and Workentin, B.P. (山内豊聡・竹中 隆・東山 勇・前田 隆 監訳) (1978): 新編 土質工学の基礎, 鹿島出版会.

第6章 底泥の沈降特性

第6.1節 概 説

前章までに、底泥の流送形態や流動曲線が二つの底泥グループの間で違うことを明らかにした。本章では底泥の沈降形態の特性について述べ、沈降形態も二つの底泥グループ間で異なり、その原因がこれまでと同様吸着陽イオンにあることを示す。底泥の沈降特性の解明は、底泥のグループの判別のみならず現地での底泥の堆積状態を把握する上でも重要な課題である。そのために、ここでは初期濃度が 0.016kg/l 以上(含水比で示せば6000%以下)という比較的濃い場合について、底泥の種類、初期濃度(含水比)および初期沈降高さが底泥の沈降現象や最終沈降状態に及ぼす影響を実験的に検討する。さらに、底泥グループの識別という観点から、沈降形態を支配する要因について考察する。また底泥の現地での堆積状態の把握という観点から自重圧密状態についても理論的考察を加える。

底泥沈降特性は、底泥の重要な物性の一つであり、土の分散・凝集現象と深く関係している。単分散もしくは部分的集合体が分散している場合には、それらの粒子がおのおのの独立に沈降する。土粒子が系全体にわたる構造を作る場合、独立沈降はなくなり土粒子が互いに干渉し合って沈降する。土粒子分散系の沈降過程では、図6-1に示すような、沈降粒子上端に現れる沈降面と、沈降粒子下部に現れる沈積面とが区別される。しかし、粒子の種類や初期濃度によっては、片方の面しか現れない。安定な単分散のような場合には、沈降面は拡散的になり明瞭でなく、沈積面が明瞭に現れる。一方、全体にわたる構造をもつような場合、沈降面は明瞭であるが沈積面は明瞭ではない。前者を自由沈降、後者を凝集沈降と呼ぶ。

沈降面は界面とも呼ばれ、凝集沈降は界面沈降とも呼ばれる。界面沈降速度は自由沈降速度より小さくなり、その度合いは初期濃度が高いほど大きい。今回の実験範囲では、第一底泥グループが界面沈降、第二底泥グループが自由沈降を呈した。沈降面はやがて沈積面と同

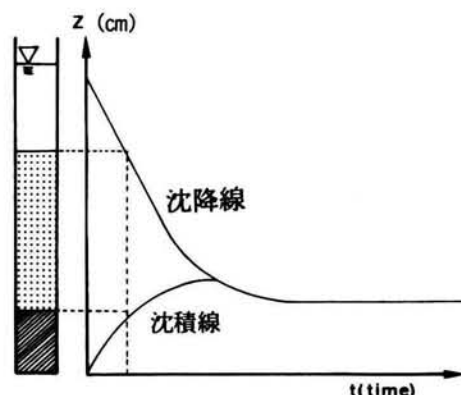


図 6-1 沈降線と沈積線

じになるが、これ以降では全ての土粒子が何等かの形で接触し自重を伝達するために、自重による圧密沈降過程へ移行する。圧密沈降量は凝集性の高いものほど大きくなる傾向がある。

第 6.2 節 実験条件および方法

実験に用いた底泥の種類を表 6-1 に示す。以後の記述においては、特に断らないかぎり、粘土も含めて一括して底泥と称する。実験に用いた沈降筒は、内径 60mm の透明アクリル円筒である。沈降筒の下部は図 6-2(a) に示すように二重栓になっている。実験終了後に下のゴム栓を抜き、図 6-2(b) に示すように残ったもう一つのゴム栓ごと底泥を押し出すことによって、最終状態での含水比測定用のサンプルを採取する。

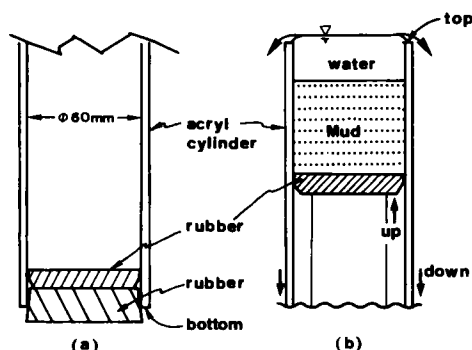


図 6-2 沈降筒下部の仕組みと底泥試料の採取方法

実験の手順は次のようである。蒸留水を加えて目的の初期含水比に調整し、24時間蒸留水になじませた後、5分間攪拌して均一にする。それを沈降筒に流し込み蓋をして静置する。この時を実験開始時刻として、その後適当な時間間隔で、界面高さもしくは沈積面高さを測定する。今回の実験では、原則として6日後(144時間後)を最終状態とした。実験終了後は前述の方法で底泥のサンプルを採取した。初期沈降高さは 230mm と 115mm の 2種類とした。初期含水比条件は表 6-1 の◎、○および*印の位置で示される。表 6-1 中の含水比表示は対数座標を用いている。¹⁾²⁾

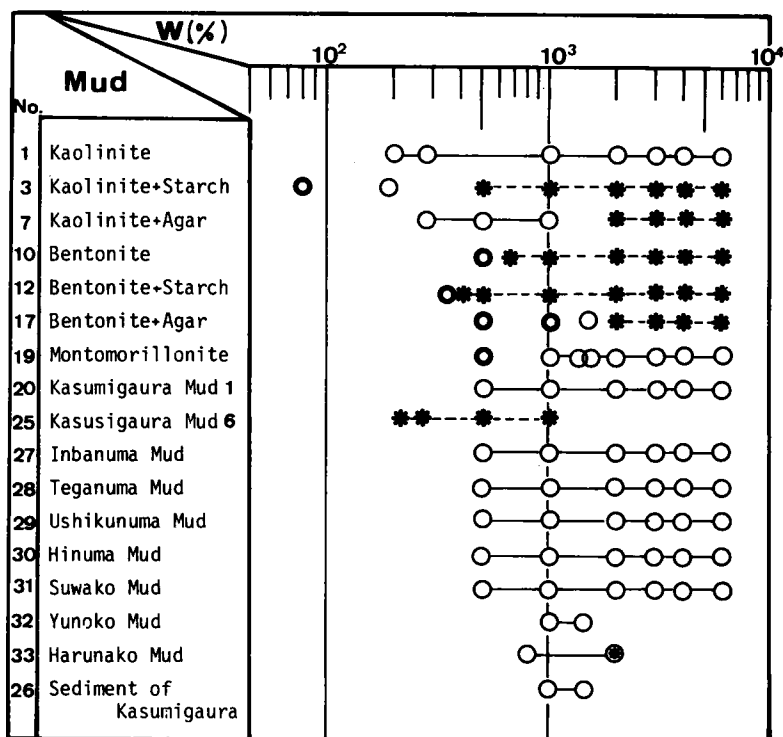
第 6.3 節 底泥の沈降形態

表 6-1 は底泥の沈降形態を初期含水比 w_0 によって分類したものである。沈降形態には初期高さ H_0 の影響は現れなかった。表 6-1 中の◎印は、実験開始から終了時まで界面も沈積面も現れない場合で、最終状態での含水比も鉛直方向に変化していなかった。この状態は、斥力が主要な粒子間力である底泥ではこの斥力が自重に抵抗するために、一方、凝集力が強

い底泥では粒子の凝集により形成された構造が自重に抵抗するために実現されると考えられる。表6-1 中の○印は、界面が現れそれが時間と共に低下した場合で、界面沈降および圧縮沈降に分類される。表6-1 中の*印は、自由沈降に分類されるもので、粒径の大きいものが沈降して沈積面を形成し、その高さがゆっくり増加したものである。この場合、沈積面の上部に高濃度の懸濁液が存在した。

底泥別に沈降形態の特徴を記すと次の通りである。カオリナイトは全条件で○印となった。源粉含有によって、初期含水比 w_0 が 190%以上では界面が現れず*印に、190%以下から界面

表 6-1 沈降実験に用いられた底泥の種類とその沈降形態



が現れ○印に、さらに80%以下で◎印となった。寒天含有の場合、 w_0 が 2000% 以上では*印に、1000%以下から○印となっており、界面の現れる上限の含水比は 1000~2000% の間に存在すると考えられる。ベントナイトはどの初期含水比条件でも界面は現れず、或る初期含水比以上になると沈降形態が◎印から*印に変化した。源粉を含有した場合も同様であった。寒天含有の場合は界面が現れた。◎印となる w_0 の値はベントナイトの場合の 2倍近く上昇し、 $w_0 = 1500\%$ で界面沈降を呈し $w_0 = 2000\%$ では自由沈降となったので、界面沈降を呈する上限の w_0 の値は1500~2000%の間にあると考えられる。湖沼泥は、今回の初期含水比の範囲では俣名湖泥を除いて全て○印となった。俣名湖泥では $w_0 = 2000\%$ が○印と*印の遷移域になっ

た。これに比べ Kasumi Mud 1 の○印と＊印の遷移域は $w_0 = 20000\%$ 付近であった。腐植除去処理を施された Kasumi Mud 6 は Mud 1 とはかなり異なった特性を示し、 $w_0 = 235\%$ という低い値でも界面は現れなかった。沈積した底泥の含水比は 50% 程度にまで縮まっていた。この底泥は非常に固く沈積し均一になりにくい、分散した懸濁液の粘度は小さく粘りがないのが特徴である。写真 6-1 は最終状態（6日後）の一例である。条件は初期沈降高さ H_0 が 230 mm および初期含水比 w_0 が 4000% である。澱粉含有カオリナイト、寒天含有カオリナイトおよび全てのベントナイト主成分粘土で沈積面が現れ、他の底泥では界面が現れている。

澱粉や寒天含有によって現れた沈降形態は次のように説明される。澱粉は可溶性のため、粘土分散系において保護コロイドとして作用し粘土の凝集を抑制する。³⁾ そのために微細粒子の安定な分散と大粒径粒子の自由沈降が起こる。寒天は常温でゾル化せず立体的構造を形成し、その内部に水分子や粘土粒子を取り込んでいる。高濃度懸濁液ではその立体構造が互いに絡み合って全体的な構造を形成し界面沈降を呈するが、低い濃度懸濁液となると全体的な構造が形成されず数十 μm の大粒径粒子は速やかに自由沈降し、微細粒子は寒天粒子による緩衝作用のため凝集が妨げられ分散状態で存在する。

棒名湖泥において、界面沈降から自由沈降へ遷移する初期含水比条件が 2000% と他の湖沼泥に比して小さくなったのは、棒名湖泥の平均粒径 d_m が 34.5 μm と大きいこと、さらに試料が一旦乾燥していたためと考えられる。乾燥状態を経た底泥では、液性限界、塑性指数、粘度なども同一種類、同一含水比でも生土よりかなり低下することが知られている。

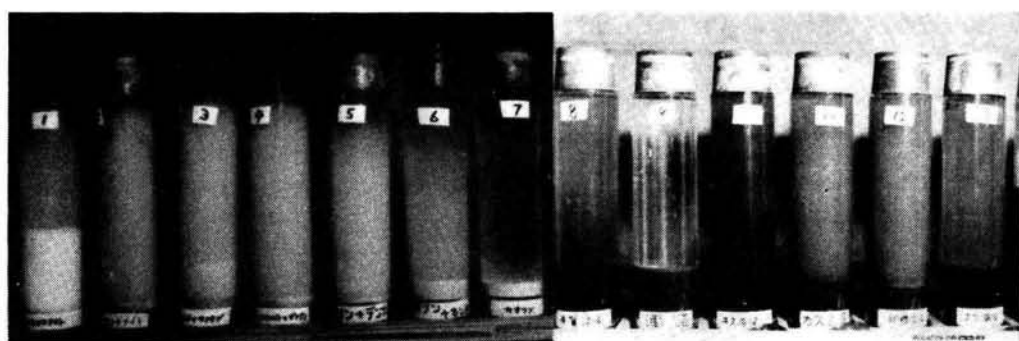


写真 6-1 底泥および粘土の最終沈降状態（6日後、 $w_0 = 4000\%$ 、 $H_0 = 23.0\text{cm}$ ）

第 6.4 節 界面および沈積面の時間変化

6.4.1 界面および沈積面の時間変化曲線

図 6-3 の二つの図は、各底泥における界面および沈積面の時間変化を示したものである。界面は時間と共に下降し、沈積面は時間と共に上昇する。曲線の右端にある記号は実験条件を示し、その条件は図中の表に示されている。A シリーズは初期沈降高さ H_0 が 230 mm、B シリーズは H_0 が 115 mm のものである。同一初期含水比条件での実験も数ケース行った結果、再現性は比較的良かった。界面の現れた底泥は、モンモリロナイトを除いて初期含水比 w_0 が 20

00%以上の条件で 24 時間後にはほぼ最終状態に落ち着いていた。 w_0 が大きいほど、最終状態となる時間は早くなる。 w_0 が1000%の条件では、110日後でも圧密が完了していない底泥もあったが、一応 6日後を最終状態とすれば十分と考えられる。沈積面の現れた場合も同様である。界面沈降の場合には、全ての底泥において、 H_0 が同じ条件では、 w_0 が小さいものほど最終沈降体積比 $H_{\infty}/H_0 (= \phi_{\infty})$ が大きく、同一時刻における H/H_0 の値も大きい。一方、 w_0 が同じ条件では、 H_{∞}/H_0 の値は、ほとんどの場合 H_0 が 115mmのものが 230mmのものよりわずかに高かった。

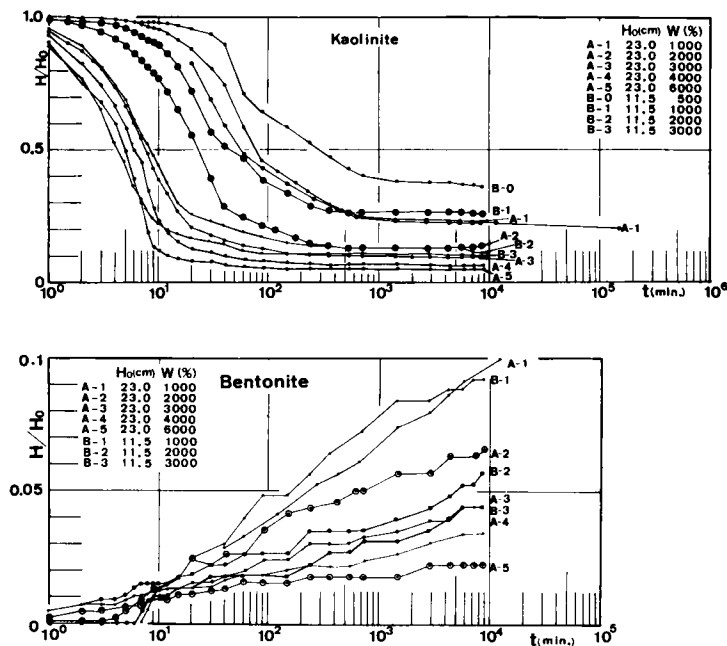


図 6-3 底泥の沈降曲線（初期含水比および初期沈降高さの影響）

6.4.2 界面沈降に及ぼす底泥の種類の影響

図 6-4の二つの図は、初期沈降高さ H_0 と初期含水比 w_0 が同じ条件で、底泥の種類による界面の時間変化の違いを比較した一例である。 H_0 および w_0 が同じでも底泥によって H_{∞}/H_0 がかなり異なることがわかる。最終状態に至るまでの H/H_0 の値は必ずしも H_{∞}/H_0 の大きい底泥が大きくなっている。例えば、カオリナイトは w_0 が1000%以上では実験開始から10分前後までは一部の底泥より H/H_0 の値は大きい、 H_{∞}/H_0 は必ず最小である。また潤沼泥は w_0 が2000%と3000%の場合、実験開始から 24時間程度までは H/H_0 の値は大きい、それ以後は圧密の進行が早く、 H_{∞}/H_0 の値は諏訪湖泥や手賀沼泥より小さくなる。 w_0 の値によって、底泥の粒度構成や分散・凝集特性が底泥の網目構造の形成に与える影響が微妙に異なるため、このような結果が現れたと思われる。

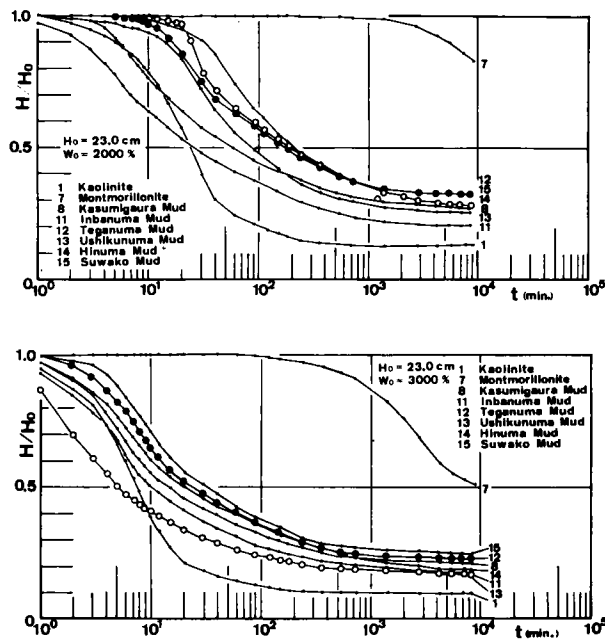


図 6-4 底泥の沈降曲線（底泥の種類の影響）

第 6.5 節 土粒子の分散および凝集

表 6-1，写真 6-1 および図 6-3 に示したように，初期含水比 w_0 が同じでも底泥の種類によってその沈降形態が異なり，第一底泥グループに属する底泥は界面沈降を呈し，第二底泥グループに属する底泥は自由沈降を呈した。底泥の沈降形態は，有機物除去や有機物含有によっても変化する。これらの現象の起こる要因を探り，カオリナイト，ベントナイトおよびモンモリロナイトを用いて実証する。これらの粘土は組成が明確で，さらに有機物等による複雑な影響を無視できるので，土粒子の表面状態の考察が単純化される。

底泥の沈降特性は，土粒子の分散・凝集作用に支配されている。粘土粒子が溶液に接すると，電気二重層を形成する（図 6-5 参照）。これをミセルといい，一つ一つのミセルは電気的に中性である。土粒子の分散・凝集は DLVO 理論によって説明される。^{4), 5), 6)}

粒子間には，電気二重層の重なり合いに基づく静電反発力と普遍的に働く Van der Waals 力が作用している。二種の力の関係を図 6-6 に示す。⁷⁾ V_R は静電反発エネルギー， V_A が吸引エネルギー， V が全エネルギーである。 V_{max} が十分大きいければ，ブラウン運動などで近づいてきた粒子を反発させ安定な分散状態となる。 V_{max} が小さかったり，負になったりすると凝集する。分散系における V_A は容易に変化しないので， V_R を大きくすることにより安定な状態が実現される。 V_R が大きいということは，電気二重層が厚いということである。その条件としては，次の四つが考えられる。①土粒子の陽イオン交換容量（CEC）が大きい。②吸

着陽イオンの解離度が大きい。③溶液中の電解質が一価の陽イオンを持ち、その濃度が低い。
④溶液がアルカリ性である。^{3), 7), 8)}

これらの知見をもとに、三つの粘土の間で沈降形態が異なる理由を考える。カオリナイトとモンモリロナイトでは粘土鉱物の構造が違うために陽イオン交換容量は大幅に異なる。そのために界面高さには違いが現れたが、界面が現れる点で両者の沈降形態は同じであった。一方、ベントナイトはモンモリロナイトの不純物で、両者の粘土鉱物の構造や吸着陽イオン交換容量はほとんど同じであるにも関わらず、ベントナイトの沈降形態は沈積面の出現とそ

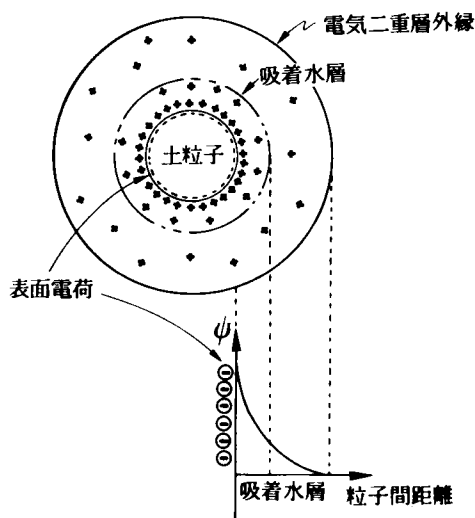


図 6-5 電気二重層の模式図

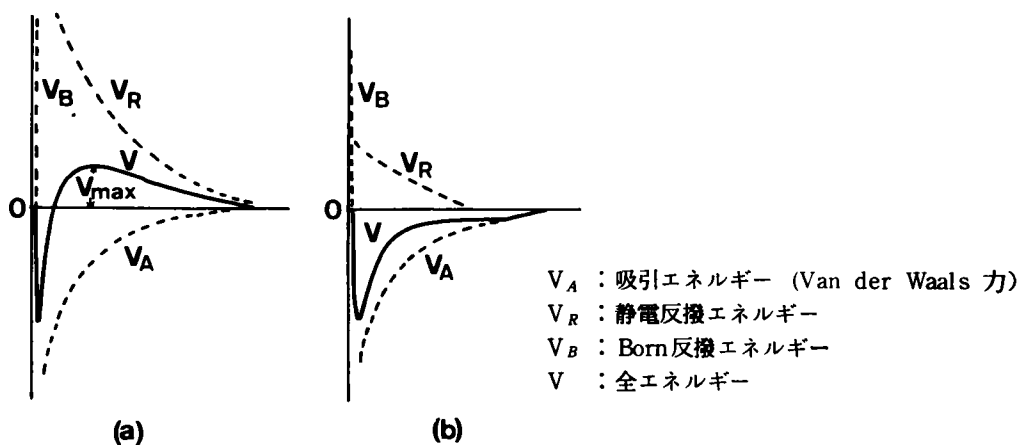
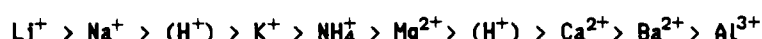


図 6-6 土粒子の反発と吸引エネルギー

の上部の高濃度の懸濁体の存在が特徴で、前二者とは沈降形態が異なった。これらのことから、陽イオン交換容量や粘土鉱物自体の構造の特徴は沈降形態に直接的には関与しないと考えられる。また溶媒としては蒸留水を用いたので、溶媒の影響もないと考えられる。以上のことから三つの粘土で沈降形態が異なったのは、吸着陽イオンの違いが原因と考えられる。電気二重層が厚くなる吸着陽イオンの順位は、一般に



である。H⁺の順位には二つの説がある。^{7), 8)}

三つの粘土の吸着陽イオンの種類と量はプラズマ発光分光分析装置 (ICP) による分析結果から推定した。表 6-2 は、ICP により求めた各粘土の吸着陽イオン量を反映する金属元素量である。上段が g/kg で示した値であり、下段が通常用いられる me/100g (me: ミリグラム当量) で示した値である。右端の CEC (me/100g) は従来から知られている各粘土の陽イオン交換容量である。

表 6-2 ICP による粘土中の金属元素同定量 (上段: g/kg, 下段: me/100g)

| Mud | B | Na | Mg | Al | Ca | Mn | Fe | N ⁺ | CEC |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|----------------|---------|
| Kaolinite | 0.003 | 0.001 | 0.02 | 0.12 | 0.18 | 0.002 | 0.02 | 0.03 | 3~15 |
| | 0.03 | 0.004 | 0.17 | 1.33 | 0.9 | 0.01 | 0.11 | 0.07 | |
| Bentonite | 0.008 | 158.4 | 0.56 | 0.17 | 1.69 | 0.06 | 0.89 | 1.07 | 100~150 |
| | 0.08 | 68.9 | 4.76 | 1.88 | 8.45 | 0.3 | 4.9 | 2.49 | |
| Montmorillonite | 0.002 | 0.015 | 0.28 | 0.03 | 1.87 | 0.002 | 0.02 | 0.1 | 100~150 |
| | 0.02 | 0.075 | 2.33 | 0.33 | 3.77 | 0.01 | 0.11 | 0.25 | |
| Na ⁺ -Kaolinite | 0.003 | 0.336 | 0.005 | 0.078 | 0.016 | 0.001 | 0.04 | 0.02 | |
| | 0.03 | 1.344 | 0.04 | 0.86 | 0.08 | 0.005 | 0.22 | 0.05 | |
| Ca ²⁺ -Bentonite | 0.009 | 0.80 | 11.31 | 0.47 | 27.8 | 0.16 | 3.35 | 0.63 | |
| | 0.09 | 3.18 | 10.9 | 5.19 | 139 | 0.8 | 18.4 | 1.58 | |
| Na ⁺ -Montmorillonite | 0.003 | 3.89 | 0.025 | 0.02 | 0.08 | 0.0007 | 0.004 | 0.10 | |
| | 0.03 | 16.9 | 0.20 | 0.22 | 0.04 | 0.007 | 0.02 | 0.25 | |

カオリナイトでは CEC のうち約 75% が Al³⁺ および Ca²⁺ で、ベントナイトでは定量総和の 91.5 me/100g のうち 75% が Na⁺ で、およびモンモリロナイトでは 90% 近くが H⁺ で占められていることがわかる。PH はカオリナイトが中性、ベントナイトが弱アルカリ性、モンモリロナイトが弱酸性であり、この特性は ICP の結果から説明できるものである。即ち、ベントナイトでは、主な吸着陽イオンである Na⁺ の一部が水の H⁺ と置換する分、溶液中の H⁺ が減少し弱アルカリ性となる。モンモリロナイトでは、主な吸着陽イオンである H⁺ が粘土表面から解離した分、弱酸性となる。カオリナイトとモンモリロナイトが界面を形成したのは、

粘土表面に Ca^{2+} , Al^{3+} および H^+ が吸着陽イオンしているためであり、ベントナイトで微細粒子の分散系が現れたのは Na^+ が吸着しているためであると考えられる。これを確認するために、粘土の吸着陽イオンを置換して沈降形態の変化を調べた。カオリナイトおよびモンモリロナイトは Na^+ に置換し、ベントナイトは Ca^{2+} に置換した。

置換操作後の粘土ペーストから抽出した金属元素量を表 6-2 に示す。 Na^+ -カオリナイトでは Na^+ が置換前より 340 倍近く増加している。 Ca^{2+} -ベントナイトでは置換前に比して、 Ca^{2+} が 16 倍に増加し Na^+ が 20 分の 1 に減少した。ただし、 Ca^{2+} は一部電解質として存在していると考えられる。 Na^+ -モンモリロナイトでは、 Na^+ は置換前より 225 倍ほど増加しているが、 H^+ が全て Na^+ に置換されてはいないと思われる。これらの粘土について、沈降実験を行った結果、 Na^+ -カオリナイトと Na^+ -モンモリロナイトには沈積面と微細粒子の分散系が現れ、 Ca^{2+} -ベントナイトには界面が現れた。吸着陽イオンの置換により三つの粘土で沈降形態が入れ代わることが確認され、吸着陽イオンが沈降形態を支配するという上記の推論が実証された。しかし、自然界の底泥には典型的なキレート物質である腐植酸等の有機物が含まれており、陽イオンがこれらキレート物質に結合されるため、底泥の諸性質の及ぼす陽イオンの影響は粘土の場合のように単純ではない場合も考えられる。

第 6.6 節 最終状態の特性

図 6-7 は初期沈降高さ H_0 が 230mm の場合の、最終沈降体積比 H_{∞}/H_0 と初期含水比 w_0 の関係を両対数紙上に示したものである。

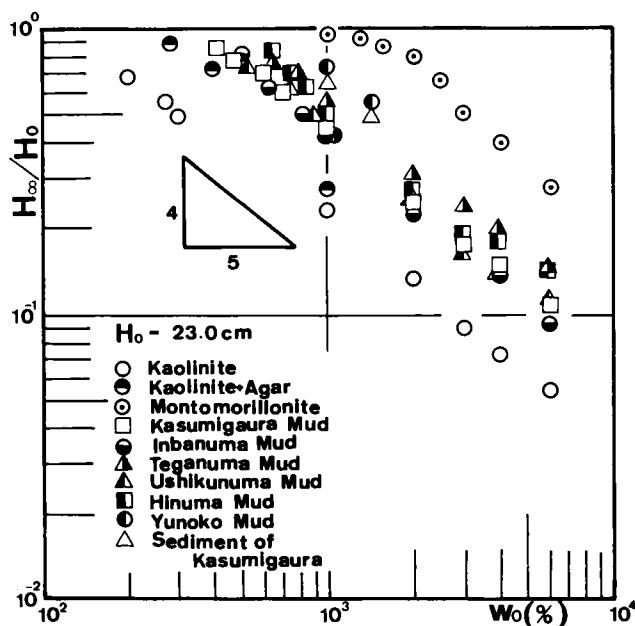


図 6-7 最終沈降体積比と含水比の関係

底泥の種類により比例定数の値は異なっているが、各底泥とも

$$H_{\infty}/H_0 \propto w_0^{-4/5} \quad (6-1)$$

の関係が認められる。比例定数の値は、同一含水比条件での粘度 η_1 が大きな底泥ほど大きくなる傾向がある。ここで式 (6-1) の関係を、最終沈降体積比 H_{∞}/H_0 と底泥の乾燥重量 W_s の関係に書き改めることにする。含水比 w と重量濃度 C (kg/l) の間には次の関係がある。

$$C = \rho / \{ (1/G_s) + (w/100) \} \quad (\text{kg/l}) \quad (6-2)$$

ここで、 G_s は土の比重、 ρ は水の密度である。式 (6-2) から、 w_0 が大きな値の場合には C_0 はほぼ w_0 に反比例することがわかる。また、初期沈降高さ H_0 が一定の場合、乾燥重量 W_s は重量濃度 C_0 に比例するので、式 (6-1) の関係は

$$H_{\infty}/H_0 \propto W_s^{\alpha_0} \quad (\alpha_0 \div 4/5) \quad (6-3)$$

と書き換えられ、最終沈降体積比 H_{∞}/H_0 ($= \phi_{\infty}$) は底泥の乾燥重量 W_s に正比例しないことがわかる。図 6-7 の結果は、最終沈降体積比と初期含水比 (真の初期固相濃度) との関係が底泥の種類により異なること示しているが、最終沈降体積比 ϕ_{∞} が底泥懸濁液の有効濃度 ϕ と深い関わりがあることは、前章の 5.5.5 で述べた。

つぎに自重圧密の影響について検討する。表 6-3 は最終沈降高さ H_{∞} の結果を基に、底泥の沈降現象に及ぼす自重圧密の影響をみたものである。

表 6-3 最終沈降体積比に及ぼす底泥の乾燥重量の影響

| Mud \ r_H | w_0 (%) | | |
|-----------------|-----------|------|------|
| | 1000 | 2000 | 3000 |
| Kaolinite | 1.13 | 1.00 | 1.05 |
| Montmorillonite | 1.01 | 1.00 | 1.07 |
| Kasumi. Mud 1 | 0.98 | 1.06 | 1.09 |
| Inbanuma Mud | 1.05 | 1.11 | 1.06 |
| Teganuma Mud | 1.04 | 1.06 | 1.10 |
| Ushikunuma Mud | 1.05 | 1.08 | 1.06 |
| Hinuma Mud | 1.00 | 1.10 | 1.18 |
| Suwako Mud | 1.04 | 1.03 | 1.06 |

表中の r_H は w_0 が同一の場合次式で与えられる値である。

$$r_H = (H_{\infty}/H_0)_B / (H_{\infty}/H_0)_A \quad (6-4)$$

ここで、下つき記号の A および B は、それぞれ初期沈降高さが 230mm および 115mm の場合を示す。以下もこれに準ずる。初期含水比が同一の条件では、底泥の乾燥重量 W_s には、 $W_{sA} = 2W_{sB}$ の関係がある。自重による圧密が起こらなければ $r_H = 1$ となるべきであるが、結果はほとんどの場合 $1 \leq r_H \leq 1.1$ となった。乾燥重量の大きなものほど自重圧密による堆積層下部での締め具合が大きいために、最終沈降体積比が小さくなったと考えられる。図 6-8 は、底泥の最終沈降状態での含水比の鉛直分布の一例を示したものであるが、含水比が深さと共に低下しており、自重圧密の効果が明確に現れている。

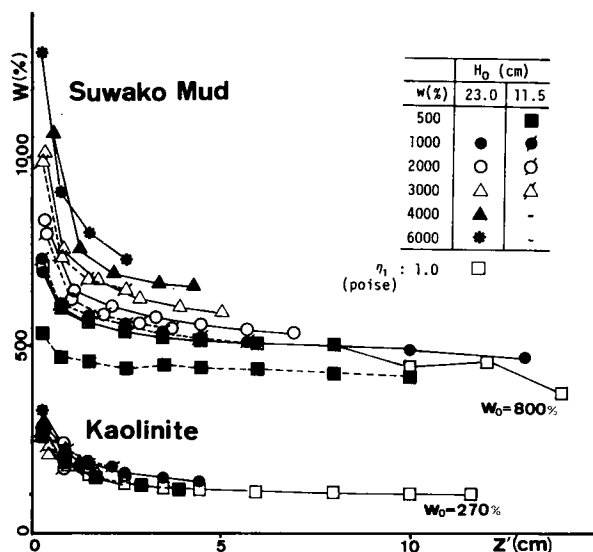


図 6-8 最終沈降状態における底泥の含水比の鉛直方向分布

第 6.7 節 沈降特性に関する理論的考察

6.7.1 沈降曲線

界面の高さと時間の関係を示す曲線をその底泥の沈降曲線 (settling curve) という。沈降曲線は底泥の種類、凝集状態などに応じて種々の形態をとるが、普通、図 6-9 に示すようである。最初のある時間までは定速沈降区間 (constant settling-rate period) が存在し、この時間を過ぎると減速沈降区間 (decreasing settling-rate period) に入り、界面直下の底泥濃度が初期値より大きくなり、界面沈降速度は徐々に減少してゆく。この区間は圧縮脱水区間 (compression period) と呼ばれることもある。定速沈降区間と減速沈降区間の境界を圧縮点というが、この圧縮点は明確でないこともある。減速沈降区間は、底泥全体が相互に接触して自重を伝達し、系全体が圧密過程にあるという考え方と、堆積濃縮されても最終状態まではゾルの状態にあり、土粒子は液中に浮遊し自重を伝達しないという考え方とがある。通常は堆積濃縮が少ないうちはゾルの状態にあり、ある程度濃縮が進むにつれてゲル化して自重を伝達するものと考えられる。その意味で、減速沈降区間の前半を遷移区間と呼ぶ

場合もあるが、それと圧密区間の境界の判定は非常に難しい。

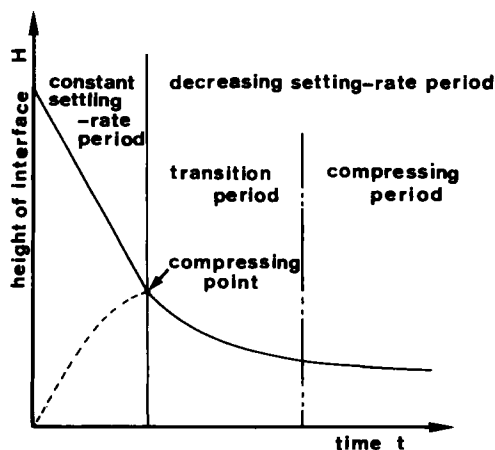


図 6-9 沈降曲線の領域区分

圧密沈降期間に入らない沈降現象に対しては、Work-Kohlerの式が有名である。これは初期濃度 C_0 が同一で、初期沈降高さ H_0 の異なる沈降曲線は相似であるという経験式である。

$$H/H_0 = \text{fun}(t/H_0)$$

(H_0 : 初期高さ)

(6-5)

ここで H は時刻 t における界面高さである。今回の実験に用いた底泥は、おおむね式 (6-5) が成立していた。式 (6-5) により同一の底泥について初期高さのみが異なる沈降曲線は推定できるが、底泥の種類が異なったり初期濃度が異なったりする場合は推定できない。^{9),10),11)}

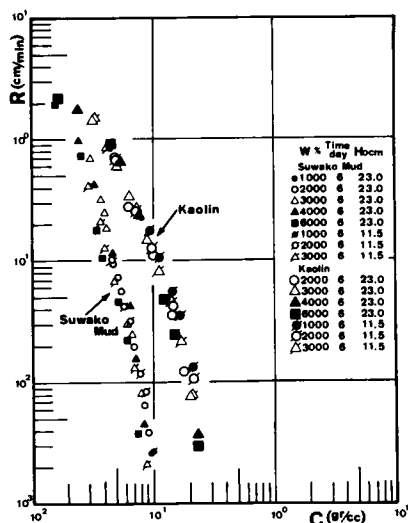


図 6-10 底泥濃度と沈降速度との関係

沈降曲線についての本格的な理論的研究としては、Kynchの理論が知られている。¹²⁾ Kynchは、均質スラリの或る層の沈降速度はその部分の局所濃度のみの関数であると仮定し、物質収支式のみから沈降曲線および沈降層中の濃度分布について重要な知見を導いた。Kynchの理論における基本式は、

$$\partial C / \partial t + \partial (CR) / \partial h = 0 \quad (6-6)$$

ここで、Cは濃度、Rは上向きを正とする沈降速度、hは鉛直上向きの座標である。検討の結果、Work-Kohlerの関係式は Kynchの理論によって説明できることがわかった。¹³⁾ Kynchの理論によれば、同一スラリーについて一本の沈降曲線が求められれば、任意の初期濃度および初期沈降高さの条件での沈降曲線が推定できる。図 6-10 は今回の沈降実験から求めたカオリナイトと諏訪湖泥に対する Cと Rの関係である。Kynchの仮定がほぼ満足されているが、Cと Rの関係は底泥の種類により異なることもわかる。またこの理論では、沈降槽下底に堆積濃縮した泥状物は最終濃度 C_{∞} に至までゾルの状態にあり、粒子は液中に浮遊して自重伝達がないということを前提にしているため、圧密沈降区間には本来適用されないものである。

6.7.2 圧密沈降に関する理論

圧密沈降に関する理論的研究も少なくない。圧密沈降の特色は、自重による圧密であること、全層厚に比して圧密量が大きいことである。圧密の理論的研究では、Terzaghiの圧密方程式が有名であるが、自重圧密や沈下量が大きいときには、初期条件や境界条件の設定が難しくなる。特に圧密量が大きいときは、固相の各微小要素の鉛直座標が変化するので、Terzaghiの理論のもとになる仮定が成立しない。このことについては、三笠¹⁴⁾が詳しく論じている。一般の圧密沈降の理論では、村田¹⁵⁾がまとめているように、過剰間隙水圧、間隙水圧もしくは有効応力に関する拡散方程式型の偏微分方程式を導いているものがほとんどである。ただ、圧密量が大きいのでLagrange座標による記述を用いている。¹⁶⁾ 近年、Kos et al.¹⁷⁾に始まって、固液二相流の立場から、沈降現象全般を解析する研究が試みられている。^{18), 19)} 各研究者により基本変数や座標の取り方などに若干の違いはあるが、本質的には同一なものである。固相および液相の支配方程式は次の通りである。

連続式：

$$\text{固相} \quad \partial(1-n)/\partial t + \partial\{(1-n)u_s\}/\partial z = 0 \quad (6-7)$$

$$\text{液相} \quad \partial n/\partial t + \partial(nu)/\partial z = 0 \quad (6-8)$$

運動方程式：

$$\text{固相} \quad (1-n)(\partial p/\partial z) + \partial p_{s0}/\partial z - F(n)(u-u_s) + (1-n)\sigma g = 0 \quad (6-9)$$

$$\text{液相} \quad n(\partial p/\partial z) + F(n)(u-u_s) + n\rho g = 0 \quad (6-10)$$

沈降現象においては、現象の進行が非常に緩慢であるので、式 (6-9) および式 (6-10) において、加速度項は無視した。ここで、 z は鉛直固定座標で上向きが正、 n は底泥の空隙率で、沈降現象の場合には空隙は全て水で飽和されている。 u_s は固相の移動速度、 u は液相の移動速度、 σ は固相の真密度、 ρ は水の密度、 p は液相の圧力および p_{s0} は固相の圧力である。また $F(n)$ は固相と液相の相対速度に比例して作用する力に関する定数で、一種の抵抗係数であり、 g は重力の加速度である。自由および定速沈降区間では、 $p_{s0} = 0$ である。また、沈降筒内の沈降では、次式が成立している。

$$(1-n)u_s + nu = 0 \quad (6-11)$$

$C = (1-n)\sigma$, $m_v = -\partial n / \partial p_{s0}$, $F(n) = n^2 \rho g / K(n)$ の関係を用いて式 (6-7) から式 (6-11) までを整理すると、底泥濃度 C に対して次のような拡散型偏微分方程式¹³⁾を得る。

$$\begin{aligned} \partial C / \partial t + \{(\sigma - \rho) / \sigma \rho\} [\partial \{K(n) C^2\} / \partial z] \\ = \{1 / (\sigma \rho g)\} [\partial \{K(n) C / m_v\} (\partial C / \partial z)] / \partial z \end{aligned} \quad (6-12)$$

ここで、 m_v は体積圧縮係数、 $K(n)$ は透水係数である。右辺 = 0 とすれば、Kynchの式と同形になり、式 (6-12) は Kynchの理論を圧密沈降区間にまで拡張したものと考えられる。自重圧密では、 m_v と $K(n)$ は鉛直方向に一定と考えることはできない。沈降過程全般にわたって、 m_v と $K(n)$ が n もしくは C の関数として与えられれば、式 (6-12) から数値解析などにより底泥濃度の時空間変化 $C(z, t)$ が求められるが、現状では m_v と $K(n)$ は実験ごとにしか決められない。

6.7.3 最終状態での底泥層の鉛直濃度分布

現地での底泥の堆積状態を把握するためには、最終沈降状態がより重要な問題となる。最終状態では $u_s = 0$ であり、この関係と式 (6-9)、式 (6-10)、式 (6-11) および $C = (1-n)\sigma$ の関係より、最終状態での底泥濃度の鉛直分布に関する支配方程式は次式で与えられる。

$$(1/m_v)(dC/dz) = -(\sigma - \rho)gC \quad (6-13)$$

圧密過程での m_v と n もしくは m_v と C の関係が与えられれば、最終状態での C の鉛直分布が求められる。松尾・嘉門²⁰⁾ のヘドロに対する圧密実験結果を参考にして、固相の圧力と間隙比 e に対して次式を仮定する。

$$p_{s0} = p_{s01} \exp\{A_c(e_1 - e)\} \quad (6-14)$$

ここで、 e_1 は $p_{s0} = p_{s01}$ なる場合の間隙比、 C_c は圧縮指数、 $A_c = 1/(0.435C_c)$ である。よって m_v は次式のように書き換えられる。

$$1/m_v = -(dp_{s0}/dn) = -(de/dn)(dp_{s0}/de) = \sigma^2 A_c p_{s0} / C^2 \quad (6-15)$$

式 (6-14) および式 (6-15) を式 (6-13) に代入する。この際、 p_{s01} を沈降筒最下部での圧密荷重 $C_0 H_0 g(\sigma - \rho)/\sigma$ で与え、 $e = (\sigma/C) - 1$ を考慮すれば次式を得る。

$$z_* = -\exp\{(A_c \sigma / C_0)(1/C_{*1} - 1/C_*)\}(1/C_* + C_0/A_c \sigma) + \phi_{\infty} \quad (6-16)$$

上式においては z , C をそれぞれ初期高さ H_0 および初期濃度 C_0 で無次元化して、 z_* および C_* とした。また、 $C_{*1} = C_1/C_0$ であり、さらに C_1 は $e = e_1$ となる C の値である。 ϕ_{∞} は

$$\phi_{\infty} = H_{\infty}/H_0 = 1/C_{*1} + A_c C_0 / \sigma \quad (6-17)$$

で与えられる最終状態での体積分率である。

式 (6-17) より ϕ_{∞} は C_0 および σ が一定の条件では、 C_{*1} と圧縮指数 C_c によって決まることがわかる。この C_{*1} と C_c は圧密荷重 p_{s0} と間隙比 e の関係を表す式 (6-14) を規定するパラメーターでもある。図 6-11 は、 C_* と z_* の関係に及ぼす C_{*1} と C_c の影響を、 $C_0 = 0.1 \text{ kg/l}$, $H_0 = 230 \text{ mm}$, $\sigma = 2.6 \text{ kg/l}$ の条件で検討したものである。図から C_{*1} が一定の場合には、 C_c の増加により ϕ_{∞} は上昇するが界面直下での C_* は減少することが、また、 C_c が一定の場合には、 C_{*1} の増加により ϕ_{∞} は低下するが界面直下での C_* は増加することがわかる。

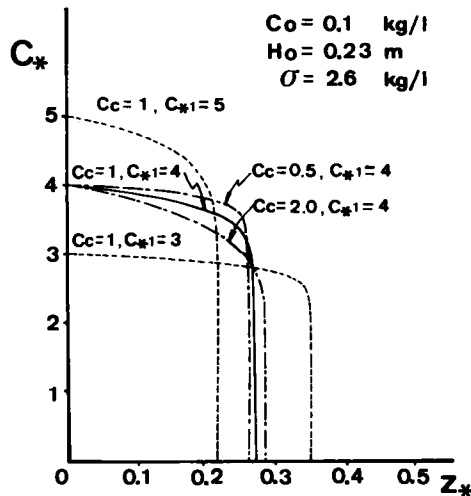


図 6-11 C_{*1} および C_c の値が底泥濃度の鉛直分布に及ぼす影響

図 6-12 は、最終沈降状態での C_* の鉛直分布の実験結果と計算結果を比較したものである。破線は式 (6-16) より計算されたものであるが、その際、 C_c の値としては C_{*1} と ϕ_{∞} の実験値を式 (6-17) に代入して求めた値を用いた。カオリナイトでは $C_c = 1.65$ 、霞ヶ浦底泥 (Kasumi Mud 1) では $C_c = 3.24$ である。土質工学の分野においては、圧縮指数 C_c の値につい

ては Skempton による経験式がよく知られている。乱した土の試料にたいしては、 C_c は次式で与えられている。²¹⁾

$$C_c = 0.007(w_L - 10) \quad (w_L : \text{液性限界}) \quad (6-18)$$

カオリナイトでの $w_L = 51.05\%$ 、霞ヶ浦底泥での $w_L = 212.5\%$ を式 (6-18) に代入して C_c を求めると、カオリナイトでは $C_c = 0.29$ 、霞ヶ浦底泥では $C_c = 1.42$ となる。図 6-12 の一点鎖線はこれらの値を用いて計算されたものである。この場合 ϕ_{∞} は実験結果より小さくな

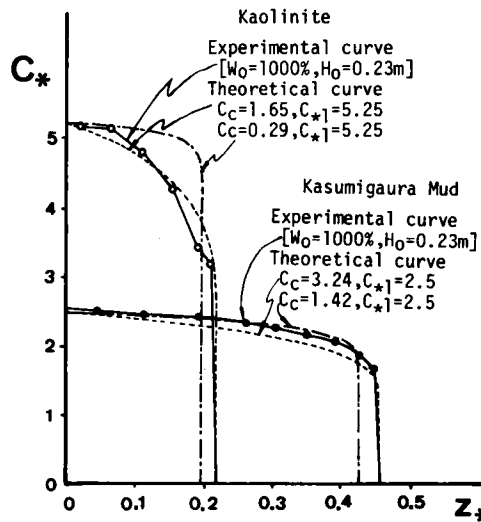


図 6-12 最終沈降状態における底泥濃度の鉛直分布の実験値および計算値

っている。実験結果と式 (6-17) から求めた C_c の値が式 (6-18) で与えられる C_c より大きくなった理由として次のことが考えられる。ここで対象とした沈降現象の最終状態としての自重圧密の場合には、圧密荷重が非常に小さく荷重よりも土粒子の堆積構造が圧密に大きな影響を与えていると考えられる。この状態では堆積構造の変形による間隙比の減少が大きく、それを反映して圧縮指数 C_c が大きくなったと考えられる。一方、式 (6-18) が適用される圧密状態では、圧密荷重が非常に大きく堆積構造がすでに押し潰され、それ以上の変形が起こりにくいため、圧縮指数 C_c が小さくなると考えられる。

また土質工学の対象とする圧密現象では、同一の土に対しては一つの圧縮指数 C_c のみが定義されているが、今回のような自重圧密現象では、同一の底泥での圧縮指数 C_c は初期濃度 C_0 (初期含水比 w_0) により異なり、 C_0 が小さいほど C_c は大きくなる傾向があった。この原因としては、沈降中に形成される底泥の網目構造が初期濃度 C_0 により変化するためと考えられる。たとえば、初期濃度が小さくなると大粒径粒子は速やかに沈降し、網目構造の形成に関与しないというようなことが起こると考えられる。

第6.8節 結 論

本章では底泥の沈降特性に関する実験的・理論的研究を行った。底泥の沈降特性の解明は、現地での底泥の堆積状態を把握するためにも、また、他の物性値と共に底泥の流送特性との関係を検討する上でも必要である。そのため初期濃度が比較的高い場合の静水沈降実験を行い、底泥の種類、初期含水比および初期高さが、最終状態での沈降高さや含水比の鉛直方向分布に及ぼす影響を検討した。その結果、同一初期含水比条件でも、底泥の違いにより全く異なった沈降形態が現れた。その原因は、土粒子に吸着する陽イオンの種類にあると推論した。これを確認するために、吸着陽イオンを置換して沈降形態の変化を調べた。底泥は沈降形態により、二つの底泥グループに分類される。第一底泥グループは界面沈降を呈するもので、吸着陽イオンは H^+ 、 Ca^{2+} および Al^{3+} などである。第二底泥グループは沈積面の出現と微細粒子の高濃度分散系を呈するもので、吸着陽イオンは解離度の大きい Na^+ などである。

底泥の沈降曲線は圧密沈降区間に入る前までは、Kynch の理論により記述されうえることを実験的に確認した。しかしこの理論は最終状態には適用できないため、固液二相流の立場から求められる沈降現象を記述する偏微分方程式をもとに、新に最終状態での底泥濃度（含水比）の鉛直方向分布を与える支配方程式を導いた。そして底泥の間隙比と圧密荷重との間に対数関係を仮定することにより、その式を解き最終沈降状態での底泥濃度の鉛直分布形を求めた。次に、その分布形が無次元規準濃度 C_{w1} と圧縮指数 C_c の値によってどのように変化するかを検討した。また、理論曲線が実験値によく合うように圧縮指数を決めたところ、その値はSkemptonの経験式で与えられる値よりかなり大きくなり、この理由についても考察を加えた。

参考文献

- 1) 大坪国順・村岡浩爾(1982)：底泥の沈降特性に関する研究，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集第II部，159-160。
- 2) 大坪国順・村岡浩爾(1983)：底泥の沈降特性に関する研究，第27回土木学会水理講演会講演論文集，317-322。
- 3) 日本粘土工学会編(1967)：粘土ハンドブック，技報堂，95-137。
- 4) 近藤 保(1978)：現代コロイド科学，三共出版。
- 5) 田丸謙二編(1980)：岩波講座 現代化学 16 界面の化学，岩波書店。
- 6) 向坊 隆編(1966)：岩波講座 基礎工学 13 材料の構造と性質III，岩波書店。
- 7) 川口桂三郎・熊田恭一・青峯重範・古坂澄石・佐々木清一・高井康雄・山根一郎・船引真吾(1974)：改訂新版 土壌学，朝倉書店。
- 8) Yong, R.N & B.P. Workentin (山内豊聡・竹中 隆・前田 隆 監訳) (1978)：新編 土質工学の基礎，鹿島出版会。
- 9) 井出哲夫編著(1976)：水処理工学 - 理論と応用 -，技報堂。
- 10) 化学工学協会編：化学工学便覧，丸善，892-902。

- 11) 森 芳郎・吉岡直哉編：詳論 化学工学，朝倉書店，329-374。
- 12) Kynch, G. J. (1952) : A theory of sedimentation, Trans. Faraday Society, 48, 166-176.
- 13) 大坪国順(1983) : 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究，国立公害研究所研究報告，第42号，59-65。
- 14) 三笠正人(1963) : 軟弱粘土の圧密，鹿島出版会。
- 15) 村田康弘(1979) : 泥の沈降・圧密現象における水質の挙動に関する研究，京都大学修士論文。
- 16) 栗谷陽一・藤崎一裕(1978) : 圧縮沈降に関する一考察，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集第II部，353-354。
- 17) Kos, P. & P. D. Adrian (1975) : Transport phenomena applied to sludge dewatering, Proc. A.S.C.E., 111, EE6, 945-965.
- 18) 栗谷陽一・楠田哲也・古賀憲一(1976) : 汚泥の圧縮沈降に関する基礎的研究，第13会土木学会衛生工学研究討論会講演概要集，142-148。
- 19) 松岡 譲・村田康弘・住友 恒・岩井重久(1979) : 泥の圧縮・沈降に関する数値解析，第15回土木学会衛生工学研究討論会講演概要集，34-40。
- 20) 松尾新一郎・嘉門雅史(1973) : 物理化学的見地からのいわゆるヘドロの工学的性質について，土木学会論文報告集，第209号，103-113。
- 21) 赤井浩一(1980) : 朝倉土木工学講座 5 土質工学 訂正版，朝倉書店。

第7章 現地調査および現地観測

第7.1節 概 説

第6章までに、底泥の物性や再浮上特性に関する実験室レベルでの研究について述べてきたが、本章ではこれらに関する現地レベルでの研究について述べる。底泥の物性分布を明らかにするために霞ヶ浦西浦を対象に底泥調査を、底泥の再浮上の実態を把握するために霞ヶ浦高浜入において現地観測を行った。底泥の物性分布特性は、湖沼での物質循環や湖沼環境の変化を解明する上での基礎資料となるだけでなく、底泥の再浮上機構を解明する上でも有用である。また底泥の再浮上の実態の把握は、その数値モデルの構築やその有用性を検討する上で役立つとともに、富栄養化機構の解明にもつながるものである。

本章では、まず粒度、比重、含水比、灼熱減量比の水平および鉛直分布について述べる。そこで明らかにされた含水比の鉛直変化特性を考慮にいれて、霞ヶ浦での底泥の堆積速度や堆積量を算定する。次に、底泥の再浮上に関する現地観測に基づいて、風向・風速、波浪および濁度の諸特性について述べるとともに、風速と他の項目との関係を検討する。さらに、その結果をもとに霞ヶ浦での底泥の再浮上プロセスについての考察を行う。

第7.2節 調査および観測の概要

7.2.1 底泥の現地調査

底泥試料の採取は、1981年7月に実施した。採取方法は、透明アクリル製の押し込み式コア・サンプラーによった。コアの長さは1m、内径は40mmである。同一採取地点で四本のコアを取り、それぞれ物性、栄養塩類、重金属および放射性核種の測定・分析用とした。物性と栄養塩類の分析では底泥を泥表面から0~20mm、20~50mm、50~100mm、100~200mm、200~300mm、300~500mm、>500mmに分割した。物性分析用試料からは、粒度分布、含水比、比重および灼熱減量比を求めた。¹⁾

底泥の採取地点と地点番号を図7-1に示す。採取間隔は、緯度1分、経度1分(約1.85km)の格子点上を目安としたが厳密なものではない。

7.2.2 底泥の再浮上に関する現地観測

底泥の再浮上に関する現地観測は、1983年7月から1年間の計画で開始された。観測は計測機器の防水などの保全の都合上、高浜入湾奥部に係留されている観測小屋で行った。その地点は図7-1で1の番号で示されている。この観測小屋は面積約25m²の養殖用筏の上に設置されている。小屋の北東方向に隣接して面積約400m²の隔離水界が係留されている。st.1の付近の水深は2.6mで季節や天候などにより0.2m程度変化する。

観測項目は、濁度、風向・風速、湖流（湖底面から約 0.3m 上方）および波浪である。濁度は光透過式（直射光と前方散乱光を併用）濁度計、風向・風速は微風向風速計、湖流速および流向は電磁流速計、波高と波の周期は容量式波高計により、自動計測され、カセット・テープもしくは記録紙に自動記録された。

湖上観測のため、計測機器用の電源確保が大きな問題となった。交流電源は無理なので、カー・バッテリーを八個並列に繋いで電源とした。バッテリーは観測方法によって、四日もしくは二週間毎に交換した。濁度については、連続計測もしくは 30 分毎に 5 分間計測とし、風向・風速と湖流については連続計測、波浪については 20 分毎に 1 分間計測とした。これらの計測間隔は、バッテリーや記録紙及びカセット・テープの容量によって決められた。

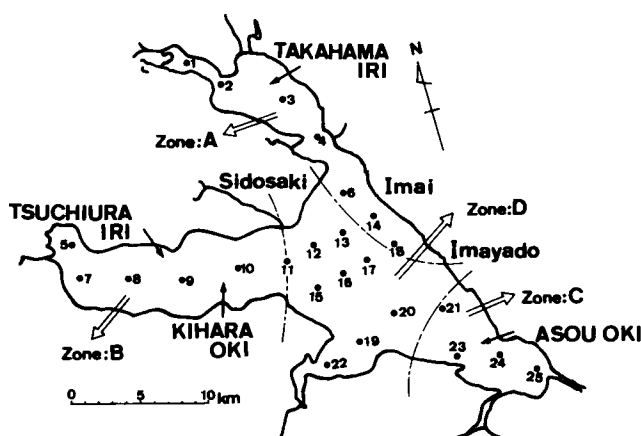


図 7-1 底泥の採取地点図

第 7.3 節 底泥の物性の分布特性

7.3.1 鉛直分布特性

底泥粒子の粒度分析（重量分布）結果から、中央粒径 d_{50} 、平均粒径 d_m および標準偏差 σ_d を求めた。粒度分布形は対数正規分布に近いものであった。図 7-2 に代表地点での d_{50} 、 d_m および σ_d の鉛直分布結果を示す。上段は高浜入から湖心へ、中段は土浦入から湖心へ、下段は麻生沖から湖心へ至る地点での結果である。 d_{50} 、 d_m および σ_d の値は、0.3 m 以浅では多少増減するが、0.3~0.5 m 層で急激に減少するのが特徴である。

図 7-3 は図 7-2 と同地点での含水比 w 、比重 G_s および灼熱減量比 $v.s.s$ の鉛直分布である。含水比はいずれの地点でも泥深とともに単調に減少している。これは第 6 章の沈降実験でも認められたことで、底泥の自重圧密が原因である。泥表面での含水比が大きいと深層での含水比も大きいが、深くなるほど各地点間の差は縮まる。藤下ら²¹⁾ の霞ヶ浦底質のボーリング調査結果では、泥深 1m 付近の含水比は約 200% となっており、0.6~1m では含水比の減少は少なく、その値は 200% 前後と推測される。底泥層内の固相濃度の鉛直分布を与える式 (6-16)

を含水比分布に関する式に変形して、その理論曲線が現地での0.6m以浅での実測分布に最もよく合うように圧縮指数 C_c を求めた。その結果、st.1 で $C_c = 3 \sim 3.5$ 、st.3 で $C_c = 5 \sim 6$ 、st.16 で $C_c = 7 \sim 9$ となった。st.1 での C_c の値は6.6 節で求めた実験室レベルでの結果とよい対応を示している。

比重は、含水比とは異なり、各地点とも鉛直方向にほとんど変化しない。ただ 25地点中、15地点で 0.2~0.3m層に極小値が現れた。また、灼熱減量比は、単調減少とはならないものの、ほとんどの地点で 0.3~0.5m層において最小値を示す。0.3 m 以浅では、泥深方向にはほぼ一様なものと、0.05~0.1m層に最大値が現れるものとに大別された。一般に、底泥の比重と灼熱減量比には負の相関があるが、上記の比重に極小値が現れた地点のうち、灼熱減量比に有意な極大値が現れたのは 2, 3地点のみであった。また、相崎ら³⁾による栄養塩類の鉛直方向分布の結果に依っても今回の比重の測定結果に現れた極小値を説明することはできなかった。

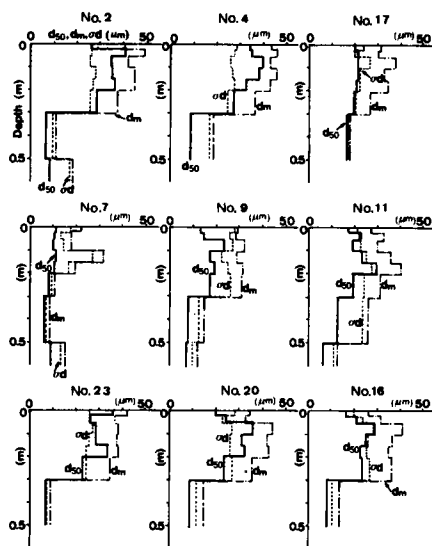


図7-2 底泥の粒度の鉛直分布

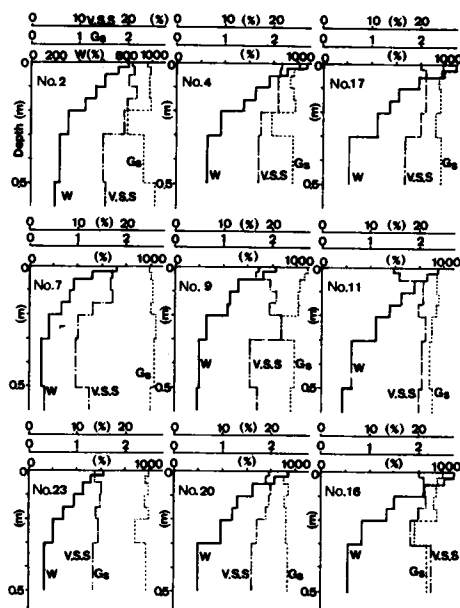


図 7-3 底泥の含水比、灼熱減量比および比重の鉛直分布

7.3.2 水平分布特性

各項目の水平分布の特性を述べるにあたり、西浦を便宜上四つの領域に分ける。高浜入～井上沖～今宿沖を結ぶ領域をA域、土浦入～湖心に向かう領域をB域、麻生沖～湖心に向かう領域をC域、湖心域をD域とする（図 7-1 参照）。図 7-4 は d_{50} の水平分布である。上から、0~0.02m層、0.2~0.3m層および0.3~0.5m層での結果ある。図中の等粒度線は、25地点の結果をもとに引いたもので厳密なものではない。0~0.02m層と 0.2~0.3m層では、四つの領域間で差が認められ、おおむね A域>C域>D域>B域の順になっている。一方、0.3~

0.5m層では四つの領域間の差がなく全域にわたり $6 \sim 9 \mu\text{m}$ の値を示す。0.3m前後に対応する堆積年代に底質環境を大きく変化させる何らかの外的条件の変化があったものと考えられる。

図 7-5に含水比の水平分布を示した。上から、0~0.02m層、0.15~0.2m層および0.3~0.5m層での結果である。st.1とst.25は砂質である。0~0.02m層には、四つの領域間で差があり、A域 \div D域 (1000~1200%) > B域 (700~950%) > C域 (300~700%) となっている。0.15~0.2m層では領域間の差がほとんどなくなり、ほぼ全域で400~600%の値を示す。0.3~0.5m層では、砂質域を除いて全域で 200~250%の値となっている。底泥の表層部に地域差が現れた理由としては次のことが考えられる。底泥は自重により圧密を受けているが、この程度は圧密荷重のみならず堆積構造や粒子の大きさ・形状などにも影響される。自重が小さい場合には堆積構造の影響が大きい。その場合の堆積構造は土粒子個々の特性に支配され、有

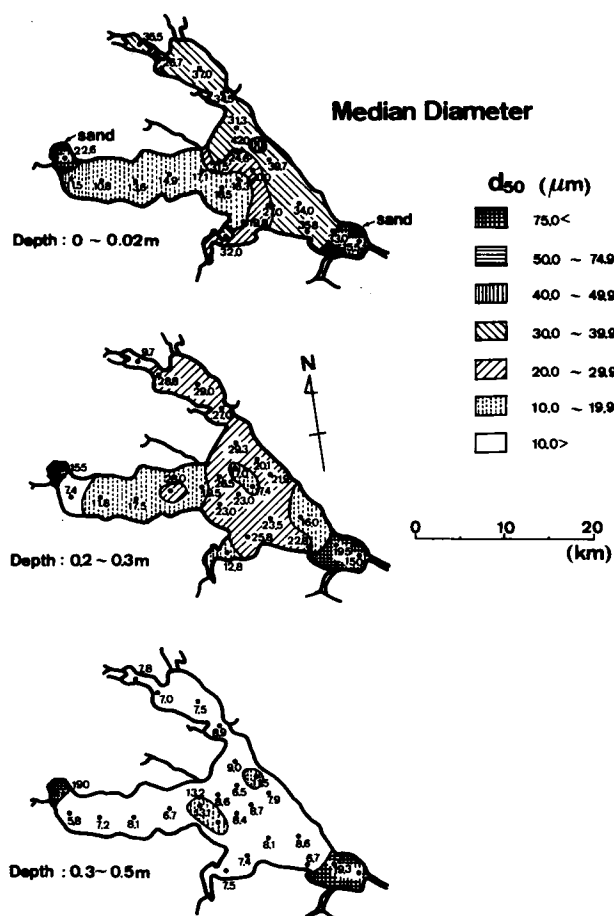


図 7-4 底泥の中央粒径の水平分布

機物を多く含んだ土粒子ほど沈定容積が大きくなり含水比が高くなる。表層部では堆積年数が短く有機物の分解が進んでいないので、沈降する土粒子の特性の違いが堆積構造に反映するため、含水比にも地域差が現れたと考えられる。一方、泥深が増すと、有機物の分解が進み堆積構造の違いがなくなると共に自重の影響が大きくなるが、自重には大差がないため圧密の進行が同程度となり、含水比の地域差が小さくなると考えられる。比重の水平分布の特徴は次のようである。表層部では含水比の高い地域で小さく低い地域で大きいという地域差があるが、泥深が増して含水比に地域差が小さくなるにつれて、比重にも地域差がなくなり0.3~0.5m層ではほぼ全域で2.4前後の値となる。灼熱減量比の水平分布は、比重の場合と反対に、含水比の高い地域で大きく低い地域で小さくなる。泥深とともに地域差が小さくなるのは他の場合と同様で17%前後の値をとる地点が多くなる。

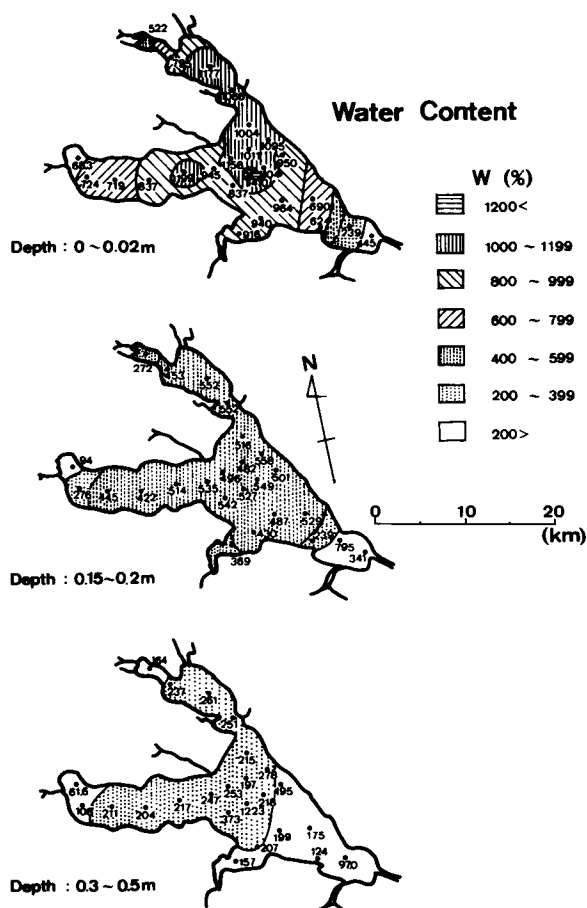


図 7-5 底泥の含水比の水平分布

7.3.3 季節変化

図 7-6 の一連の図は、調査地点 1 及び 16 (湖心) における含水比、比重および灼熱減量比の季節変化である。夏期には、アオコと呼ばれる植物プランクトンが大発生し、その一部が死骸として沈殿・堆積するため、比重が低下し、灼熱減量比と含水比が高くなるものと考えられる。1983 年 2 月に灼熱減量比が高くなった原因はよくわからない。季節変化については、さらに調査を継続する必要がある。

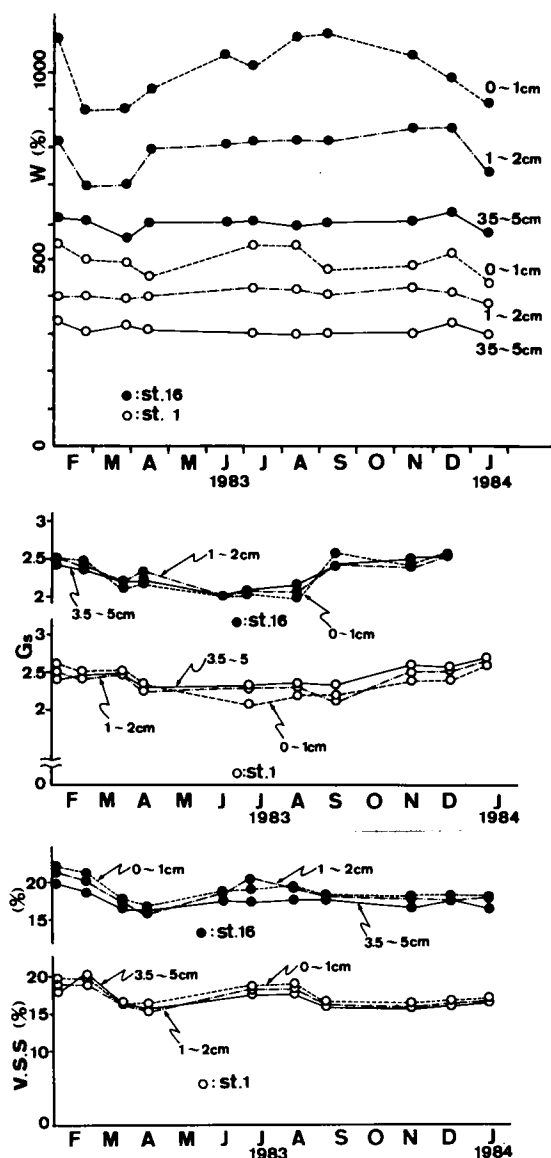


図 7-6 底泥の含水比，比重および灼熱減量比の季節変化

第 7.4 節 霞ヶ浦における堆積速度

霞ヶ浦での底泥の堆積速度はさまざまな観点から検討され、5~10数 mm/yr という推定値が報告されている。^{4), 5), 6), 7)} しかし、井内ら⁸⁾ は底泥層中の火山灰を鑑定して、0~4.1 mm/yr なる値を示し、従来の推定値は過大であると報告している。これらの推定値は、何らかの層もしくは物質を選び、その堆積年代を何らかの方法で推定して、(存在する深さ) ÷ (堆積経過年数) として求められた。しかし、含水比の鉛直方向変化が大きい場合にはこの方法は誤差が大きくなる。自重圧密のため、表層と数十 cm 下とでは単位体積中の固相重量はかなり異なる。この条件下では、後で述べる理由により年代推定の対象となる層が深いほど、 $[L T^{-1}]$ の次元で表示される堆積速度は小さくなる。このような場合には $kgf/(m^2 yr)$ などの表示法が妥当と考えられ、この方法でも、含水比の鉛直方向分布を介在させれば、堆積経過年数に対する堆積厚さを求めることができる。ここでは、含水比の鉛直方向分布を考慮して、底泥の堆積速度を評価する方法とそれを適用した結果について述べる。

堆積速度を $kgf/(m^2 yr)$ で表示するためには、累積堆積重量 W_{sd} の鉛直方向変化が必要となる。この $W_{sd}(z)$ は、堆積層内の固相濃度 $C(z)$ を積分することにより得られる。 $C(z)$ の分布形は、式 (6-16) から求められる。図 7-7 は、このようにして計算された霞ヶ浦の湖心域での $C(z)$ 、 $w(z)$ および $W_{sd}(z)$ の分布曲線である。実線が $w(z)$ 、破線が $C(z)$ 、一点鎖線が $W_{sd}(z)$ である。その際、図中●印で示される含水比の実測データをもとに、圧縮指数 C_c を 8.0 とし、境界条件を $H_{\infty} = 0.65m$ で、 $p_{s01} = 918N/m^2$ および $C_1 = 0.42kg/l$ とした。 $C_c = 8.0$ という値は、表層部で形成されるカードハウスのような堆積構造を反映したものと考えられる。ただし、この値は深さ数十 cm までが適用限度である。図 7-7 より、 W_{sd} は z の高次の増加関数であることがわかる。年間堆積重量が同じであるとする、堆積経過年数は W_{sd} に比例するので、深さ z については高次の増加関数となり、堆積年代推定の対象となる層が深くなるほど、mm/yr などで表現される堆積速度は小さくなることがわかる。ここで、図 7-7 の結果をもとに、従来報告されてきた堆積速度について検討する。井内ら⁸⁾ は、底泥コアサンプル中に見出される浅間 A 層 (1783 年の浅間山噴火による火山灰層) を堆積速度推定に用いた。この浅間 A 層は、湖心域を中心に広い範囲で約 0.55m の深さに存在する。この深さを 200 年で除せば、2.75mm/yr となる。いま、図 7-7 より、 $z = 0.55m$ での W_{sd} を求めると $123kgf/m^2$ となり、200 年間の平均では $0.615kgf/(m^2 yr)$ という年間堆積重量が得られる。20 年間では $12.3kgf/m^2$ 堆積したことになる。この $W_{sd} = 12.3kgf/m^2$ に対応する z の値を図 7-7 より逆算すれば、 $z = 0.1m$ となる。これを mm/yr で表現すれば 5mm/yr となる。この値は浅見ら⁴⁾ の結果にほかならない。

図 7-8 は、泥深 z と堆積経過年数 $Y(yr)$ の関係である。図中、A~J の符号のついた○印は外岡ら⁵⁾ の推定結果である。実線は含水比の鉛直方向変化を考慮して求めた推定曲線であり、その推定方法は次のようである。外岡らの対象とした地点では、浅間 A 層が 0.6~0.7m の深さにあるので、 $Y = 200yr$ で $z = 0.65m$ (図中▲印、K 点) を基準とした。図 7-7 から $z = 0.65m$ での W_{sd} は約 $160kgf/m^2$ となる。年間堆積重量が一定とすると、その値は $0.8kgf$

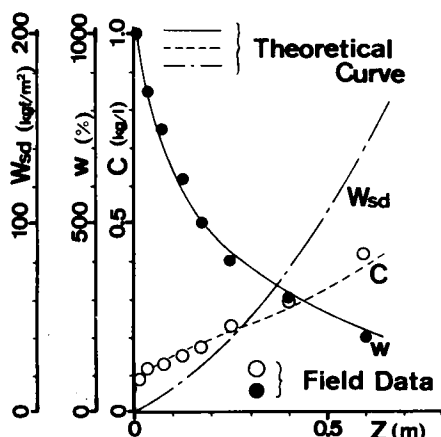


図 7-7 底泥の含水比、濃度および
累積堆積重量の鉛直変化

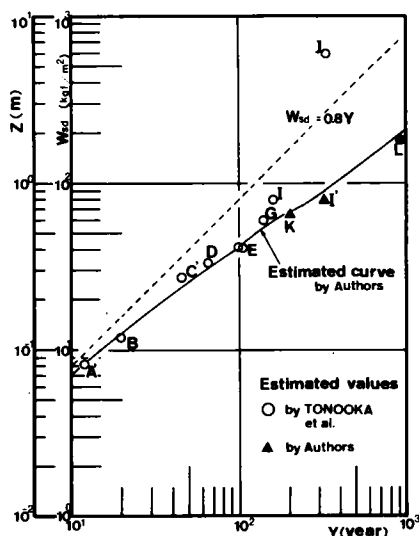


図 7-8 霞ヶ浦湖心域での底泥の
堆積年数の推定曲線

$/(m^2yr)$ となる。 W_{sd} と Y の関係を示したものが図 7-8 中の破線である。 Y の各値に対して W_{sd} を求め、その W_{sd} に対応する z を図 7-7から求めれば、 $Y < 200yr$ での z と Y の推定曲線が得られる。 $Y > 200yr$ に対しては、藤下ら²⁾の $z = 1m$ までの含水比のデータを参照して、 $0.65m < z < 1m$ で $w = 200\%$ で一定と近似して、 $z(Y)$ を求めた。A～Gまでの外岡らの推定結果と、ここで求めた推定曲線とは良好に一致している。しかし、外岡らのI、J推定結果とはかなり異なる。外岡らは、I点($z = 0.8m$)を1813年の耕地開拓と考え、J点($z = 6m$)を1654年の赤堀川の開削と対応づけた。そのため、1813年から1654年の約160年間に、約5.2m、乾燥重量にして $2.5tf/m^2$ ($w = 200\%$ として換算)という莫大な量の堆積があったことになる。外岡らは、流路変更による急激な堆積を考えればおかしくないとしているが、このような堆積がこの間にあれば、西浦の湖地形を含む湖周辺の地形に大きな変化が起こったはずであるが、そのような事実はない。さらに井内らによれば、 $z = 1 \sim 2m$ の深さに浅間B層(1108年頃)⁸⁾の火山灰層が全域に確認されるとしている。以上の理由により外岡らのI、J点の推定年数は妥当性を欠くものと思われる。著者は、I点を1654年($Y = 321yr$)と対応づけ、図 7-8 でI'点(▲印)として示す。一方、J点の堆積年代はかなりさかのぼると推測される。図 7-8の推定曲線は浅間B層(●印L点)の結果とも良好に一致し、推定曲線の妥当性がうかがわれる。以上、含水比の鉛直方向変化を考慮した解析の結果、井内らの推定値は浅見らや外岡らの推定値と何ら矛盾するものではないことが明らかとなった。湖心域では、年間 $6 \sim 8kgf/m^2$ の堆積があるが、これを mm/yr で表示すると過去20～30年では $5 \sim 10mm/yr$ 、数百年では $2.2 \sim 3.3mm/yr$ となる。

第7.3節で、底泥の物性や灼熱減量比が0.3~0.5m層を境に大きく変化していることを指摘したが、相崎ら³⁾の栄養塩類の分析結果でも0.3m以浅の底泥は栄養塩類の含有率が高い。霞ヶ浦西浦における0.3m以浅の底泥の堆積量は乾燥重量で約600万t、湿潤重量で約3900万tとなる。この試算においては、底泥の堆積している地域を117.4km²（西浦の約70%⁹⁾）とし、含水比の鉛直方向分布を考慮にいった。霞ヶ浦での年間堆積量を0.615~0.8kgf/(m²yr)とすると、上記の量が60~85年間で堆積したことになる。また0.5m層は130~175年前に対応するので、30~50m層の底泥が堆積したと考えられる60~175年前に霞ヶ浦の底泥の物性を大きく変える外的環境の変化があったと推察される。相崎ら³⁾は、その要因として利根川の一連の改修工事を挙げた。60数年前には利根川の水が霞ヶ浦に自由には流入できなくなり、このことが霞ヶ浦の底質環境を変えたというのは十分考えられることである。

第7.5節 底泥の再浮上に関する現地観測¹⁰⁾

7.5.1 風向・風速の特性

霞ヶ浦の周辺は平坦地形であるので、湖面上の風向・風速とも全域ではほぼ一様と考えられる。st.1と美浦村の国立公害研究所霞ヶ浦臨湖実験施設での風向・風速の結果を比較した結果、相関係数は0.92となり、一様性が確認された。後者の方が、精度が良いので、解析にはこれを用いた。観測期間中、7~9月には、E、SEおよびSの風向が卓越し、10~3月には、N、NNEおよびNNWの風向が卓越した。図7-9は夏期（7/28~8/11、8/12~9/7）と秋期（10/24~11/19、11/20~11/30）の風速変動のパワー・スペクトルである。パワー・スペクトルの計算には最大エントロピー法を用いた。縦軸には波数を乗じてピークを強調している。夏期の結果には、1日と半日に対応する波数域に顕著なピークが現れている。一方、秋期の結果には夏期の場合ほど顕著なピークはないが、2.5日程度に対応する波数域に弱いピークが存在する。夏期には、午前中には風がなく午後から風が吹き出し、夜になって止むという日変化パターンが多く、それを反映したスペクトル結果となっている。夏期の最大風速は台風時を除いて6m/s前後で、さほど強くなかった。秋期のスペクトルには、移動性高気圧の影響が現れたと考えられる。秋期には夏期のような日変化パターンは少なくなり、風の強い日と弱い日が2~3日の周期で繰り返された。強い風は終日続き、日中の平均風速が10m/sを越す日もあった。12月（1983年）から1月（1984年）中旬までは、風の強い日は少なかったが、1月中旬過ぎから徐々に風の強い日が多くなり、風速も大きくなった。

7.5.2 湖流の特性

図7-10は夏期（7/2~8/11）と秋期（10/24~11/19）における湖流速変動のパワー・スペクトルである。縦軸は風速の場合と同じである。夏期については、SN方向とEW方向に分けてある。夏期には、1日相当の波数域に弱いピークが、秋期には、2~3日の波数域に弱いピークと2.5時間程度の波数域にもう一つのピークが認められる。秋期の風速には2.5時間程度の波数域にはピークが認められなかった。

今回測定した流速の値は、2.5秒毎に計測されたデータを5分または10分毎に平均して記

録されたものであるので、この値は波の影響が抑えられた潮流速値と考えられる。流速値は最大でも 50mm/s を越すことは希で、平均は 10~20mm/s であった。風速と流速の相関は、両者の30分平均値を用いても0.05とかなり低かった。この結果は、村岡・福島による報告¹¹⁾とほぼ一致する。

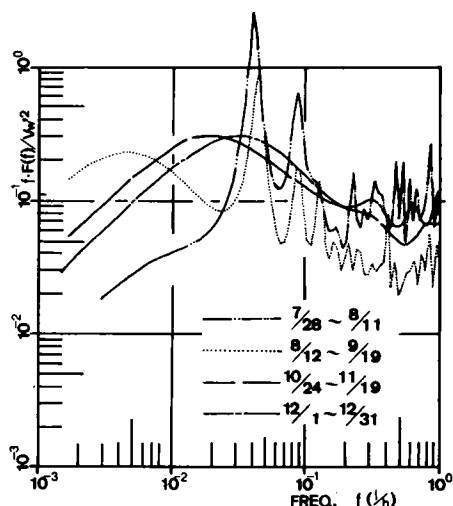


図 7-9 観測地点での風速変動のパワー・スペクトル

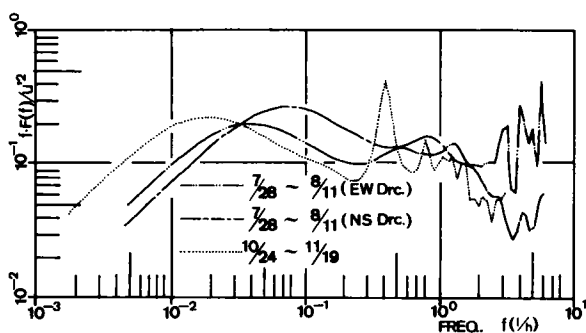


図 7-10 観測地点での潮流速変動のパワー・スペクトル

7.5.3 波の特性

波浪の計測は、9月7日の突風により波高計が破損したため、8月から約1ヶ月間の計測を行ったのみで、断念せざるを得なかった。波浪は、20分おきに約1分間記録計に、さらに1時間おきに約1分間カセット・テープレコーダーに記録された。前者の場合、記録紙の長さ

の制限から紙送り速度を 50 mm/minと遅くせざるを得ず、その記録からは波高しか読み取れなかった。波浪の周期特性は後者のカセット・レコーダーの記録より求めた。

湖沼での底泥の再浮上を考える際には、風とそれにより誘起される波との関係が重要と考えられる。代表波高としては、波高の整理が簡単にでき、また今回の実測データの性質上他の波高値と比しても信頼性が劣らないと考えられるという理由で、最大波高 H_{wmx} を選んだ。最大波高と風速 V_w (30 分代表値)との回帰分析の結果は次のようである。

$$H_{wmx} = 0.00275 V_w^2 + 0.021 \quad (\text{SI 単位}) \quad (\gamma = 0.855) \quad (7-1)$$

$$H_{wmx} = 0.047 V_w + 0.134 \quad (\text{SI 単位}) \quad (\gamma = 0.76) \quad (7-2)$$

ここで γ は相関係数で、風速の二乗値とのほうが高い値となった。波高分布が Reighleigh 分布の場合には、 N 波中の最大波高 H_{wmx} と有義波高 $H_{1/3}$ の関係は近似的に式 (7-3)で与えられる。

$$H_{wmx} / H_{1/3} = 1.07 \sqrt{\log_{10} N} \quad (7-3)$$

式 (7-3)を用いて最大波高と風速の関係を有義波高と風速の関係に書き改めると、式 (7-4)および式 (7-5) となる。

$$H_{1/3} = 0.0021 V_w^2 + 0.016 \quad (\text{SI 単位}) \quad (7-4)$$

$$H_{1/3} = 0.035 V_w - 0.10 \quad (\text{SI 単位}) \quad (7-5)$$

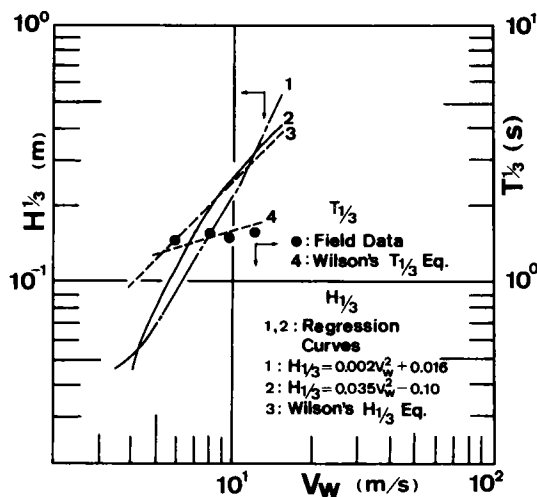


図 7-11 観測地点での有義波の波高および周期

図 7-11 中の曲線①および②は、それぞれ式 (7-4) および式 (7-5) の関係である。曲線③は Wilson¹²⁾により与えられた有義波高の推定式

$$H_{1/3} = 0.0024 (F/g)^{1/2} U_w \quad (7-6)$$

において、吹送距離 F を 1km とした場合である。

次に波の周期について述べる。zero-up cross 法により求めた平均周期 \bar{T} は最大波高が 0.15m 以上では $1.4\sim 1.6$ 秒の間で変動し、最大波高との間に明確な関係は見出しにくかったが、最大波高が 0.1m 以下では平均周期は 1 秒以下となり、全般的な傾向としては平均周期は最大波高もしくは風速と正の相関が認められた。図 7-11 中の●印は最大波高と平均周期の実測データによる関係を、風速 U_w と有義波の周期 $T_{1/3}$ との関係に直して示したものである。この際、平均周期と有義波の周期との関係としては、 $T_{1/3} = 1.1 \bar{T}$ なる経験式¹³⁾を用いた。図中の曲線④は Wilson¹²⁾の有義波の周期の推定式

$$T_{1/3} = 0.1096 \pi (F/g^2)^{1/3} U_w^{1/3} \quad (7-7)$$

で吹送距離 F を 1km とした結果である。

吹送距離は風向などにより変化し、敷密に有義波高およびその周期を評価するのはいろいろな問題が残るが、 $st.1$ 付近の有義波高およびその周期は、一応、図 7-11 の曲線③および④で評価できると考えられる。

7.5.4 濁度の特性

濁度については 1983 年 7 月 28 日から 10 月 23 日までは連続計測を行った。濁度計は光源を有するので、連続計測の場合、辺りが暗くなると光源部へ走光性動物プランクトンが集積し、そのプランクトンを求めて魚類も集まるため、濁度計は異常に高い値を示した。これらの影響を除外するために、硬質ビニールに通水性に支障をきたさない程度の小さな孔を多数あけ、これでセンサー部を被い、さらに生物が嫌う有鉛塗料を塗布した。これを塗布しない場合は、魚の影響は防げるが、動物プランクトンの集積は防げず、濁度計の出力は風のやむ止む夜間に 100ppm を越し、逆に風が吹く日中に 40ppm 以下となる日変動パターンを示した。一方、有鉛塗料を塗布した場合には、動物プランクトンの集積と思われる出力値の上昇は 10ppm 程度に抑えられた。しかし、この期間中は台風時を除いて風速が 7m/s を越えることは稀で、底泥の再浮上による濁度の出力上昇が 10ppm 程度であったため、朝方や夕方濁度の上昇が動物プランクトンの集積によるのか底泥の再浮上によるのかの判断が難しかった。唯一の判断材料は濁度の時間変化の特徴である。すなわち、動物プランクトンの影響による濁度の変化は極慢であり、底泥の再浮上によるそれは急激であった。しかしこれも確定的なものではない。

動物プランクトンの影響を極力抑えるために、10月24日からはタイマー作動により、30分毎に5分間計測する方法に切り替えた。これにより動物プランクトンの影響と思われる濁度の上昇はほとんどなくなった。

自然湖沼では、動植物プランクトンや各種の懸濁態物質が常時浮遊して一定の濃度を保っている。この濃度を基底濃度 C_b と呼ぶことにする。晴天が続く風のない時の濁度の観測値はこの基底濃度に対応している。基底濃度値は夏場の 30~40ppm を最高に、秋には 20ppm 前後となり、さらに冬には 10ppm 前後にまで徐々に低下した。この値はその後春から夏にかけて再び上昇するという年変動パターンを示すと考えられるが、これは動植物プランクトンの生長に深く関係している。基底濃度は水底面と底面近傍を除いて、ほぼ一様であった。

濁度の観測値 C_{ob} から基底濃度を差し引いた値 C_p が底泥の再浮上による濁度の上昇分と考えられる。 C_p の値は、6~7m/s の風速では 10ppm 程度であるが、12m/s を越える風速では精度が保証される計測範囲を (≤ 110 ppm) を越すことがあった。風が収まると C_p の値は 1~2 時間以内に 10ppm 以下に下がった。また、7.2.1 で述べたように、観測ステーションの NE 方向に現地実験用筏が隣接しているため、N~NE 方向の風に対してはそれが消波の役目を果たすため波が立たず、強風が 1 日続いた場合でも C_p の値は 10~20 ppm 程度しか上昇しなかった。濁度 C_{ob} の実測値は第 8 章で示すこととして、ここでは C_p と風速 V_w についての回帰分析結果について述べる。

$$C_p = 0.016 V_w - 0.09 \quad (\text{SI 単位}) \quad (\gamma = 0.53) \quad (7-8)$$

$$C_p = 0.000936 V_w^2 - 0.03 \quad (\text{SI 単位}) \quad (\gamma = 0.53) \quad (7-9)$$

$$C_p = 0.000070 V_w^3 - 0.08 \quad (\text{SI 単位}) \quad (\gamma = 0.52) \quad (7-10)$$

ここで γ は C_p と V_w^α ($\alpha = 1, 2, 3$) の相関係数である。この場合、5m/s 以上の風速を対象とし、N~NE 方向の風速のデータは除外した。どの回帰直線の場合も濁度と風速との間に高い相関が認められる。7.5.3 で示した有義波高と風速の関係を考え合わせると、霞ヶ浦高浜入での底泥の再浮上の主な要因は、風により誘起された波浪と考えられる。

第 7.6 節 結 論

本章では、霞ヶ浦を対象とした底泥の物性分布に関する現地調査と再浮上に関する現地観測の結果について論じた。先ず底泥の物性の鉛直および水平分布特性ならびに季節変化を検討した。霞ヶ浦では 0.3m 付近を境に、底泥の物性の分布特性が大きく変化していることを明らかにした。即ち、0.3m 以浅では各物性値とも地域差が顕著でその差は浅いほど大きく、高浜入から湖心域にかけて土粒子中の有機物含有が多いこと、また 0.3m 以深では、各物性値とも全域的にはほぼ均一な分布を示し、粒度、含水比および灼熱減量比の値が 0.3m 以浅よりかなり小さいことなどである。次に、霞ヶ浦での堆積速度について検討した。現地調査でも底泥層内の含水比が泥深と共に小さくなることが確認されたので、これを考慮に入れて、従来の堆積速度の推定値を再検討した結果、堆積速度を $\text{kgf}/(\text{m}^2 \text{yr})$ で評価すれば、従来の推定値は湖心域ではいずれも 0.6~0.8 $\text{kgf}/(\text{m}^2 \text{yr})$ 程度となりほぼ同じになることを示した。霞ヶ浦の

底泥は0.3m以浅で有機物を多く含むが、0.3m以浅の底泥の量は霞ヶ浦西浦全域（砂質部を除いた 117.7km^2 ）⁹⁾ で乾燥重量にして約 600万t、湿潤重量にして約 3900万tであり、これらの底泥は 60～85年間で堆積したと推定した。60～100年前に行われた利根川の一連の改修工事により、利根川の水が自由に流入できなくなったことが、0.3m付近での底泥の分布特性に違いが現れる原因の一つと考えられる。この問題についてはさらに検討の余地が残されている。

底泥の再浮上に関する項目として、風、湖流、波浪および濁度を選び、それらの現地観測の結果を明らかにすると共に、風と他の項目との関係について検討した。風の特性は次のようである。7～9月にはE～S方向の風が、10～3月にかけてはNW～NE方向の風が卓越した。夏期には、午後から風が吹き始め6m/s程度にまで上がり、19～20時頃には収まるという日周変動を繰り返す。秋から冬には2～4日の周期の変動が卓越し、日平均風速が 10m/sを越す日もあった。湖流の特性は、最大流速でも 50mm/s程度で平均流速は 10～20mm/sと小さいことおよび風との相関係数も 0.1前後と小さいことである。波浪は風速と高い相関が認められ、観測地点付近での有義波高およびその周期と風速との関係は、Wilsonの風波の推定式¹²⁾で吹送距離を 1kmとした曲線にほぼ一致した。濁度の特性は次のようである。7～9月には底泥の再浮上が原因と推察される濁度の上昇は 10ppm程度であったが、10～3月には12m/s程度の風が吹くことがあり、その時に濁度の上昇は計測可能範囲（110ppm）を越すほどになった。濁度の風速に対する応答は 1～2時間以内と比較的速かった。

波高および濁度が風速と高い相関を持つという事実から、霞ヶ浦で起こる底泥の再浮上の主たる要因は、風により誘起される波浪であり、湖流は付随的な要因でしかないと考えられる。

参考文献

- 1) 大坪国順・相崎守弘・福島武彦・岩田敏・村岡浩爾・高松武次郎(1984)：霞ヶ浦底泥の物性と栄養塩の分布特性 (1)物性の分布特性，国立公害研究所研究報告，第51号，157-173。
- 2) 藤下利男・松本一明・堀江宏保・小川富美子(1967)：霞ヶ浦の土質調査および湖底土の土性について，港湾技研資料，No.27，1-66。
- 3) 相崎守弘・大坪国順・福島武彦・岩田敏・村岡浩爾・高松武次郎(1984)：霞ヶ浦底泥の物性と栄養塩の分布特性 (2)炭素，窒素及びリンの分布特性，国立公害研究所研究報告，第51号，175-189。
- 4) 浅見輝男・小野美紀子・三瓶英敏(1979)：霞ヶ浦および流入河川底質の重金属分布（第一報）－霞ヶ浦底質の水銀，全炭素，全窒素の分布－，日本土壤肥科学雑誌，第50巻，第2号，138-142。
- 5) 外岡達夫・熊丸敦郎・浜田篤信・津田勉(1976)：霞ヶ浦の富栄養化に関する研究 I －堆積に関する考察－，茨城県内水面水産試験場調査研究報告，(13)，1-17。
- 6) 岡野三郎・小池亮治・田口勝久(1979)：霞ヶ浦の水質汚濁に関する研究－放射性核種の分布－，水質汚濁研究，第2巻，第(4)号，216-221。

- 7) 宇都宮陽二郎(1979)：霞ヶ浦の湖底地形とその堆積速度について，国立公害研究所研究報告，第6号，7-21。
- 8) 井内美郎・斎藤文紀・横田節哉(1983)：霞ヶ浦湖底泥の堆積速度－火山灰を用いた堆積速度算定法－，地質学雑誌，第89巻，第(2)号，125-128。
- 9) 茨城大学農学部霞ヶ浦研究会編(1977)：霞ヶ浦，三共出版。
- 10) 大坪国順・村岡浩爾(1984)：霞ヶ浦における底泥の物性分布および底泥の再浮上に関する現地観測，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集第II部，409-410。
- 11) 村岡浩爾・福島武彦(1980)：陸水域の富栄養化に関する総合研究(III) 霞ヶ浦（西浦）の湖流，国立公害研究所研究報告，第19号，49-60。
- 12) 例えば土木学会編(1971)：水理公式集 昭和46年改訂版，土木学会，480-484。
- 13) 例えば土木学会編(1974)：新版 土木工学ハンドブック 下巻，技報堂，2220-2221。

第8章 底泥の再浮上現象のシミュレーション

第8.1節 概 説

本章では、露ヶ浦高浜入を対象として底泥の再浮上現象のシミュレーションを行い、湖内の濁度や底泥の浮上厚さの時間的変動を予測した結果について述べる。濁度の増加量や浮上厚さの評価は、底泥中の栄養塩類の水系への回帰量のうち底泥攪乱による量を推定する上で不可欠であるだけでなく、富栄養化防止・抑制対策の研究にも大きく寄与するものと考えられる。

底泥の再浮上現象のシミュレーションを行うためには、第1章の図1-2で示した四つのサブシステムの解明もしくはモデル化が必要である。すなわち、

- I. 底泥の限界掃流力と飛び出し率
- II. 底泥層内の含水比の鉛直方向分布特性
- III. 底泥の再浮上の原因となるせん断応力特性
- IV. 再浮上した底泥粒子の湖内での挙動

である。このうち、サブシステム I および II については第6章までに解明がなされている。残された課題はサブシステム III および IV である。そのため、まず III に関するものとして、第7章で述べた現地観測結果を基に、底泥面に作用するせん断応力の評価やその時系列のモデル化について述べる。次に、サブシステム IV に関するものとして、水平方向の挙動を無視した鉛直方向について底泥の物質収支に着目した取り扱いを行う。さらに再浮上のシミュレーションに先立って、底泥層内の含水比の鉛直分布が底泥の再浮上現象に及ぼす影響を簡単な水理条件下で検討する。最後に底泥の再浮上に関するシミュレーションの手順について述べた後、その具体例を示し、その結果について実測結果との比較を交えて考察を行う。

第8.2節 現地での底面せん断応力¹⁾

第3章および第4章で求めた底泥の限界掃流力および飛び出し率の推定式を用いて、現地を対象とした底泥の再浮上のシミュレーションを行うためには、現地での流れの状態を底面せん断応力として評価する必要がある。湖底の底泥を浮上させる掃流力 τ_B をそれに関連する原因から次のように大別することにする。

$$\tau_B = \tau_w + \tau_l + \tau_i \quad (8-1)$$

ここで τ_l は湖流底面せん断応力、 τ_w は風波によって付加される風波に応じた変動性を有す

る構成成分である。 τ_i は乱れによる変動成分である。これについては第4章で底泥の飛び出し率を推定する際に考慮済みである。 τ_i は湖流の変化に伴ったゆったりとした変動成分を有しているし、 τ_w も風波の周波数域程度の比較的ゆっくりとした変動成分を有しているが、それに加えて一様一方向流れにも含まれる変動分がありそれを τ_i と書いている。今回のシミュレーションでは、湖流速 $U_l = 60 \text{ mm/s}$ なる最大級の値に対して、抵抗係数を 0.02 として求めた 0.01 N/m^2 の値を τ_i として与え、これが定常的に働くとしている。第7章でもふれたが τ_i の値は微弱であるため、露ヶ浦での底泥の再浮上に関与する主要なせん断応力は τ_w と考えられる。このとき τ_w という交番性の底面せん断応力を底泥の掃流力としてどう評価するかが問題となる。底泥の初期移動に対して底面せん断応力の向きは問題なく大きさのみが効くので、絶対値の平均で定義される実効掃流力 $\bar{\tau}_e$ の概念を用いることとする。

現地での波浪は不規則で、その波浪による底面せん断応力を、決定論的に記述することは非常に難しい。風波は確率過程であるという立場から、風波を表現するにあたり確率論的手法が広く用いられている。²⁾ ここでも、底泥の再浮上に関与する波による底面せん断応力を評価するにあたって、実効掃流力 $\bar{\tau}_e$ なる量を定義し、その時間変動を確率過程として捉えることにした。具体的には、 $\bar{\tau}_e$ をその平均値が風速 U_w とともに変化するようなランダム変数としてモデル化し、 $\bar{\tau}_e$ の U_w についての条件付き確率分布としては正規分布を仮定した。実効掃流力の平均値 $\bar{\tau}_e$ を風速の関数として与える方法については8.2.1で述べる。8.2.2では $\bar{\tau}_e$ の標準偏差 σ_{τ} が底泥の無次元飛び出し率 $\rho_{m*}(\bar{\tau}_{e*})$ の統計的性質に及ぼす影響について検討する。

8.2.1 実効掃流力

ここでは実効掃流力の平均値 $\bar{\tau}_e$ の具体的な評価について述べる。湖面上に U_w なる風速の風が吹けば $h_w(t)$ なる不規則波浪が生じそれに呼応して湖底に $\tau_w(t)$ なる不規則底面せん断応力が作用すると考えられる(図8-1(a), (b), (c)参照)。ある時間スケール T_v の間は湖面上の風速 U_w は一定と仮定する。風速 U_w の条件付きでの湖水面上の不規則波をいま有義波に対応する波高および周期の規則波で代表する。(図8-1(d), (e)参照)。

水深を h として、微小振幅波理論における波長 L_e と周期 T_e の関係式

$$L_e = (gT_e^2 / 2\pi) \tanh(2\pi h / L_e) \quad (8-2)$$

を用いて有義波の波長を計算すると有義波の周期が1.8秒以下の場合には水深波長比(h/L_e)の値は0.5以上となり、想定した波は深水波に分類される。また波形勾配(H_e/L_e)は0.142以下となり碎波しない条件にあることがわかった。これらのことを踏まえて、観測地点付近の波浪を微小振幅波の深水波として扱うこととした。深水波の湖底面での水粒子速度 u_B は

$$u_B = \{a \sigma_w / \sinh(kh)\} \sin(kx - \sigma_w t) = \hat{u}_B \sin(kx - \sigma_w t) \quad (8-3)$$

で与えられる。ここで a は波の振幅、 \hat{u}_B は u_B の振幅、 $k = 2\pi / L_e$ 、 $\sigma_w = 2\pi / T_e$ である。

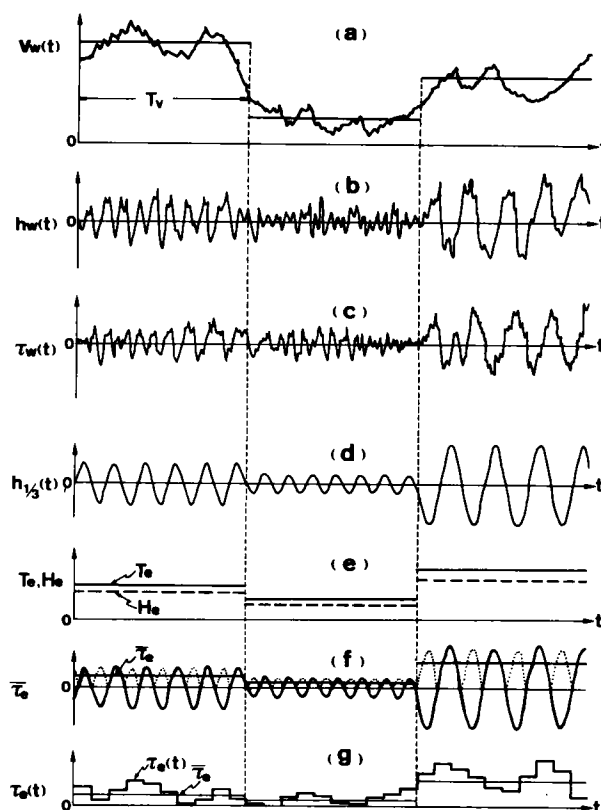


図 8-1 説明図

また湖底での質量輸送速度 U_w は

$$U_w = (1/2)a^2 \sigma_w k \{1/\sinh(kh)^2\} \quad (8-4)$$

で与えられるが、 $T_e = 1.8s$, $L_e = 5m$, $a = 0.18m$ という U_w が最大となる条件でも、 $U_w = 0.56mm/s$ と微弱であるため、 U_w の平均突効掃流力への寄与分は無視できる。

湖底面での水粒子速度が与えられた時の底面せん断応力 τ_w については層流の場合には理論解が存在し次式で与えられる。²⁾

$$\tau_w = \hat{\tau}_{wL} \sin\{kx - \sigma_w t - (\pi/4)\} \quad (8-5)$$

ここで $\hat{\tau}_w$ は次式で定義される底面せん断応力の振幅である。

$$\hat{\tau}_w = \rho \sqrt{\sigma_w \nu} \hat{u}_B \quad (8-6)$$

底面せん断応力と湖底面での水粒子速度との間には $\pi/4$ の位相差が現れる。乱流の場合も、境界層の概念を用いて計算された例があるが、^{3),4)} その手順は複雑で渦動粘性係数の与え方などに問題点がある。そのため乱流の場合は実用的観点から、粗面条件に対して振幅 $\hat{\tau}_{wT}$ を求めることに重点が置かれ

$$\hat{\tau}_{wT} = \rho \hat{c} \hat{u}_B^2 \quad \text{or} \quad (1/2) \rho f_w \hat{u}_B^2 \quad (8-7)$$

と表現した場合の係数 \hat{c} 及び f_w の値が検討されている。

底泥の再浮上の研究においても、底面せん断応力と水粒子速度の位相差の問題、底面せん断応力と底泥粒子の追隨性の問題など不確定要素が多いこと、波の評価自体が実用性の見地からかなり単純化されていることなどから、底面せん断応力の関係のみ厳密に評価することの有意性はない。そこで式 (8-7) の考え方を拡張して次式のように定義される実効掃流力 τ_e を用いて再浮上に関与する波の掃流力を評価できると考えた。

$$\tau_e = (2/T_0) \int_0^{T_0/2} \hat{\tau}_w \sin(kx - \sigma_w t + \theta) dt = (2/\pi) \hat{\tau}_w \quad (8-8)$$

ここで、 $\hat{\tau}_w$ は底面せん断応力の振幅、 θ は水粒子速度と掃流力の位相差である。

表 8-1 は、底面の粗度を $50 \mu m$ として、水粒子速度の振幅が与えられた時の掃流力の振幅値を層流理論、梶浦による方法^{4),5)}、Jonsson による方法⁶⁾ で計算した結果の一例である。砂粒のように粗度が大きい場合は、後者の二方法で計算される掃流力の振幅の方が層流解より大きいことが指摘されているが、²⁾ 底泥の場合粗度が小さいため

表 8-1 波による底面せん断応力の評価法の比較

| | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|
| $T/3$ (s) | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2.0 |
| $H/3$ (m) | 0.18 | 0.25 | 0.36 | 0.55 |
| a (m) | 0.09 | 0.125 | 0.18 | 0.275 |
| h (m) | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| \hat{u}_{Bmax} (m/s) | 0.005 | 0.019 | 0.056 | 0.115 |
| $\hat{u}_{Bmax} \delta_w / \nu$ | 3.34 | 13.6 | 42.4 | 91.8 |
| $\hat{\tau}_{wL}$ (N/m ²) | 0.011 | 0.038 | 0.104 | 0.115 |
| C | 0.03 | 0.008 | 0.006 | 0.003 |
| $\hat{\tau}_{wT1}$ (N/m ²) | 0.001 | 0.003 | 0.019 | 0.040 |
| f_w | 0.031 | 0.017 | 0.011 | 0.009 |
| $\hat{\tau}_{wT2}$ (N/m ²) | 0.001 | 0.003 | 0.017 | 0.058 |

δ_w : Laminor Boundary Layer Thickness
 $\hat{\tau}_{wL}$: for Laminor Flow
 $\hat{\tau}_{wT1}$: by Kajiura
 $\hat{\tau}_{wT2}$: by Jonsson

$$\hat{\tau}_{WL} / \hat{\tau}_{WT} = 2.0 \sim 10.0 \quad (8-9)$$

と層流解の方が大きくなる結果となった。ここで $\hat{\tau}_{WL}$ は層流として評価した値、 $\hat{\tau}_{WT}$ は粗面乱流として評価した値である。滑面条件での底面せん断応力は粗面条件に対する上記の方法で評価されると過少となると考えられる。滑面乱流での底面せん断応力は層流の場合より大きいと考えられるが、その値を評価するのは難しい。滑面乱流境界層のレイノルズ数は表 8-1 の層流境界層の結果から推定してせいぜい 10^{+3} のオーダーと考えられ、この範囲では両者の底面せん断応力に大差がないと仮定して、 $\hat{\tau}_{WL}$ で実効掃流力の平均値 $\bar{\tau}_0$ を評価することにした(図 8-1 (f) 参照)。

$$\bar{\tau}_0 = (2/\pi) \hat{\tau}_{WL} \quad (8-10)$$

ここで、これまでに述べてきた実効掃流力の平均値を求める手順を要約しておく。まず、風速に対応する有義波の波長およびその周期をそれぞれ式 (7-6) および式 (7-7) から求める(図 8-1(e) に対応)。次にその波長および周期に微小振幅波理論を適用して湖底での水粒子速度の振幅 \hat{u}_B を求め、この値と式 (8-6) および式 (8-10) から実効掃流力の平均値を求めると言うものである(図 8-1(f) に対応)。

8.2.2 底泥の飛び出し率に及ぼす実効掃流力の変動の影響

現地においては、風速の変動により実効掃流力の平均値が時間的に変化するだけでなく、風速が一定でも波の不規則性や底泥面の凹凸などの様々な原因により、底泥面に作用するせん断応力は実効掃流力の平均値のまわりに変動していると考えられる。即ち、現地での実効掃流力の時系列 $\tau_0(t)$ は、その平均値が風速の変動に呼応するランダム過程として取り扱うのが適当と考えられる(図 8-1(g) 参照)。風速条件付きでの実効掃流力の分布を正規分布と仮定すると、平均値 $\bar{\tau}_0$ は 8.2.1 の手順で与えられるが、標準偏差 σ_τ を決めることは難しい。ここでは、 $\alpha_\tau = \sigma_\tau / \bar{\tau}_0$ で定義される変動係数を用いて、実効掃流力の分布特性が底泥の飛び出し率 $p_m(\bar{\tau}_0)$ の統計的性質に及ぼす影響を検討することにする。実効掃流力 τ_0 の分布を正規分布と仮定すると、底泥の無次元飛び出し率の平均値 $p_{m*}(\bar{\tau}_{0*})$ および標準偏差 $\sigma_\tau(\bar{\tau}_{0*})$ は次のように表される。

$$\bar{p}_m(\bar{\tau}_{0*}) = \int_0^\infty p_{m*}(\tau_{0*}) f(\tau_{0*}) d\tau_{0*} \quad (8-11)$$

$$\sigma_p(\bar{\tau}_{0*}) = \left[\int_0^\infty p_{m*}^2(\tau_{0*}) f(\tau_{0*}) d\tau_{0*} - \{\bar{p}_{m*}(\bar{\tau}_{0*})\}^2 \right]^{1/2} \quad (8-12)$$

$$f(\tau_{0*}) = \{1/(\sqrt{2\pi} \sigma_{\tau*})\} \exp[-\{(\tau_{0*} - \bar{\tau}_{0*})/(\sqrt{2} \sigma_{\tau*})\}^2] \quad (8-13)$$

ここで、 $f(\tau_{0*})$ は無次元実効掃流力 τ_{0*} の確率密度関数である。さらに、 $\tau_{0*} = \tau_0 / \tau_{c2}$ 、 $\bar{\tau}_{0*} = \bar{\tau}_0 / \tau_{c2}$ 、 $\sigma_{\tau*} = \sigma_\tau / \tau_{c2}$ である。また $\bar{\tau}_0$ および σ_τ はそれぞれ τ_0 の分布の平均値と標準

偏差であり、 τ_{c2} は底泥の破壊限界値である。実効掃流力の分布の変動係数 α_τ は

$$\alpha_\tau = \sigma_\tau / \bar{\tau}_0 = \sigma_{\tau*} / \bar{\tau}_{0*} \quad (8-14)$$

で定義されるので、式 (8-14) を式 (8-13) に代入すれば

$$f(\bar{\tau}_{0*}) = \{1/(\sqrt{2\pi} \alpha_\tau \bar{\tau}_{0*})\} \exp[-\{(\tau_{0*} - \bar{\tau}_{0*})/(\sqrt{2} \alpha_\tau \bar{\tau}_{0*})\}^2] \quad (8-15)$$

となる。いま、 $y_* = (\tau_{0*} - \bar{\tau}_{0*})/\sigma_{\tau*} = (\tau_{0*} - \bar{\tau}_{0*})/(\alpha_\tau \bar{\tau}_{0*})$ とすると、式 (8-11) および式 (8-12) は次のようになる。

$$\bar{p}_{m*}(\bar{\tau}_{0*}) = \int_{-1/\alpha_\tau}^{\infty} p_{m*}(k_* \bar{\tau}_{0*}) \phi(y_*) dy_* \quad (8-16)$$

$$\sigma(\bar{\tau}_{0*}) = [\int_{-1/\alpha_\tau}^{\infty} p_{m*}^2(k_* \bar{\tau}_{0*}) \phi(y_*) dy_* - \{\bar{p}_{m*}(\bar{\tau}_{0*})\}^2]^{1/2} \quad (8-17)$$

ここで、 $\phi(y_*)$ および k_* は次式で定義される。

$$\phi(y_*) = (1/\sqrt{2\pi}) \exp(-y_*^2/2), \quad k_* = y_* \alpha_\tau + 1 \quad (8-18)$$

図 8-2 は、実効掃流力 τ_0 の変動を考慮に入れた場合の、底泥の無次元飛び出し率の平均値 $\bar{p}_{m*}(\bar{\tau}_{0*})$ と無次元実効掃流力の平均値 $\bar{\tau}_{0*}$ の関係を、実効掃流力の変動係数 α_τ をパラメータにして整理したものである。 $\bar{p}_{m*}(\bar{\tau}_{0*})$ の値は $\bar{\tau}_{0*}$ が 0.3 付近では α_τ の値によって 2 オーダーほど異なり、その値は大きな α_τ に対応するものほど大きくなる。しかし、 $\bar{\tau}_{0*}$ が増加するにつれて α_τ による差が減少し、 $\bar{\tau}_{0*} = 1.2$ 付近では α_τ による違いは無視できる程度となる。図 8-2 の結果は、 $\bar{\tau}_{0*}$ が小さくとも変動係数 α_τ の値によっては、かなりの量の底泥が浮上しうることを示唆している。図 8-3 は \bar{p}_{m*} および σ_p に及ぼす α_τ の影響を、 $\bar{\tau}_{0*}$ をパラメータにして整理したものである。実線は $\bar{p}_{m*}(\alpha_\tau)$ を、破線は $\sigma_p(\alpha_\tau)$ を示す。 $\bar{\tau}_{0*}$ の値によって \bar{p}_{m*} および σ_p に及ぼす α_τ の影響の度合が大きく変化することがわかる。全般的に、 \bar{p}_{m*} に比べて σ_p のほうが α_τ に対する変化が大きい傾向が認められる。特に $\bar{\tau}_{0*}$ が 1 付近においては、 $\bar{p}_{m*}(\alpha_\tau)$ では α_τ による変化がほとんどなくなるのに対して、 $\sigma_p(\alpha_\tau)$ では α_τ が 1.0 と 0.1 の場合で、前者の $\sigma_p(\alpha_\tau)$ が後者のそれより 4 倍程度大きな値となっている。

$$\alpha_p = \sigma_p(\bar{\tau}_{0*})/\bar{p}_{m*}(\bar{\tau}_{0*}) \quad (8-19)$$

で定義される無次元飛び出し率の変動係数 α_p の値は、 α_τ および $\bar{\tau}_{0*}$ の値によって変化する。その変化特性は概略的には次のようである。 $\bar{\tau}_{0*} < 0.5$ では $0.1 < \alpha_\tau \leq 1.0$ において常に $\alpha_p > 1$ が成立し、 $0.5 < \bar{\tau}_{0*} < 1$ では α_τ が小さい場合に $\alpha_p < 1$ となり α_τ が大きくなると $\alpha_p > 1$ となる。 $\alpha_p > 1$ となる α_τ の値は $\bar{\tau}_{0*}$ が大きいほど大きくなる。 $\bar{\tau}_{0*} > 1$ では $0.1 < \alpha_\tau \leq 1$ において常に $\alpha_p < 1$ となる。

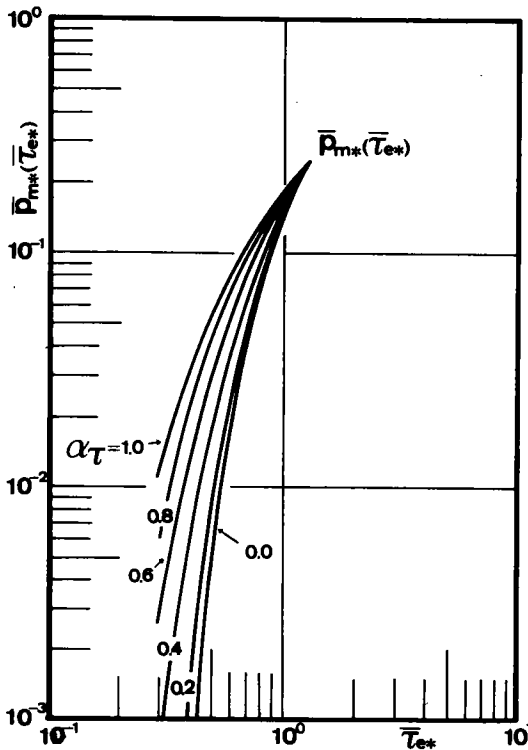


図 8-2 実効掃流力の変動を考慮した場合の底泥の無次元飛び出し率 $\bar{p}_{m*}(\bar{\tau}_{e*})$ と無次元実効掃流力 $\bar{\tau}_{e*}$ との関係

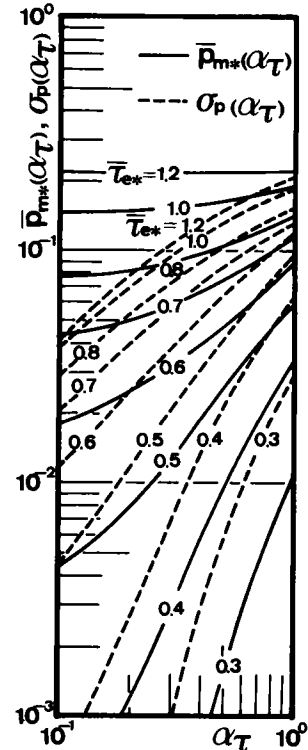


図 8-3 無次元飛び出し率の平均値および標準偏差に及ぼす実効掃流力の変動係数の影響

第 8.3 節 湖内での底泥の収支

ここでは、再浮上した底泥粒子の湖内での挙動について検討する。流水中で沈降・浮上を繰り返す物質の挙動を決定論的に記述する手段として、拡散方程式を用いて濃度分布などの形で表現する方法がある。その基本とする物質収支式は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = & \frac{\partial\{E_x(\partial C/\partial x)\}}{\partial x} \\ & + \frac{\partial\{E_y(\partial C/\partial y)\}}{\partial y} + \frac{\partial\{E_z(\partial C/\partial z)\}}{\partial z} + \frac{\partial(w_0 C)}{\partial z} \end{aligned} \quad (8-20)$$

である。ここに C は物質濃度、 u , v および w は媒体の x , y および z 方向の流速成分、 E_x , E_y および E_z は各方向の拡散係数、 w_0 は粒子の沈降速度である。濁度のシミュレーションのためのサブシステム IV の数学モデルとして、式 (8-20) を断面平均値に関するものを書き改め、さらに水平方向の収支を無視した形の物質収支式を用いることにする。まず、水底で底

泥の浮上がある場合の断面平均の物質収支式を導く。次に水底付近での境界条件に関する問題にふれ、その対応策について考察する。湖内の流れは、波や鉛直循環流の存在などにより複雑な場合が多いが、ここで想定する流れは単純なせん断乱流とする。

8.3.1 物質収支式とそれに伴う仮定

物質の流水中での挙動を正しく予測するためには、式 (8-20) に基づいて $C(x, y, z, t)$ の値を評価する必要があるが、拡散係数の与え方の難しさなどのため、煩雑で莫大な計算量のわりには大した精度が期待できない。そのため、通常は構成各項の断面平均値を求め、それについての物質収支式を考えることが多い。⁸⁾

$$\begin{aligned} \partial C_m / \partial t + (1 + \alpha_x) u_m (\partial C_m / \partial x) + (1 + \alpha_y) v_m (\partial C_m / \partial y) = \\ (1 + \beta_x) [\partial \{E_{xm} (\partial C_m / \partial x)\} / \partial x] + (1 + \beta_y) [\partial \{E_{ym} (\partial C_m / \partial y)\} / \partial y] \\ + (1/h) \int_0^h [\partial \{E_z (\partial C / \partial z)\} / \partial z] dz + (1/h) \int_0^h \{w_0 (\partial C / \partial z)\} dz \end{aligned} \quad (8-21)$$

ここで、 x および y 軸はそれぞれ底面に沿った流れ方向およびそれに直角な方向、 z 軸は鉛直上向きである。 C_m は断面平均濃度、 u_m および v_m は断面平均流速、 E_{xm} および E_{ym} は x および y 方向の分散係数、 h は水深、 α_x 、 α_y 、 β_x および β_y は断面平均化に伴う係数である。再浮上した底泥粒子の湖内での挙動を予測するためには、最終的には式 (8-21) による評価が必要となるが、ここでは現地観測の精度とのバランスも考慮に入れて、予測の第一段階として鉛直方向のみの物質収支を考えることにする。その基本式は次式となる。

$$h(\partial C_m / \partial t) = [E_z (\partial C / \partial z)]_0^h + [w_0 C]_0^h \quad (8-22)$$

水表面と水底における物質収支の境界条件は、水表面では物質が系外へ脱出しないという条件より

$$[E_z (\partial C / \partial z) + w_0 C]_{z=h} = 0 \quad (8-23)$$

水底では単位時間単位面積当たり P_m なる量の底泥粒子が飛び出すという条件より

$$[E_z (\partial C / \partial z) + w_0 C]_{z=0} = -P_m + w_0 C|_{z=0} \quad (8-24)$$

となる。この場合 $E_z|_{z=0} \neq 0$ が前提となる。

$C|_{z=0} = C_0$ と書き、式 (8-23) および式 (8-24) を式 (8-22) に代入して整理すれば、

$$h(\partial C_m / \partial t) = -w_0 C|_{z=h} + P_m + w_0 C|_{z=h} - w_0 C_0 = P_m - w_0 C_0 \quad (8-25)$$

となる。式 (8-25) がサブシステム IV を数学モデルで表現したものである。ここで C_m および C_0 について次の仮定をする。 $C_m(t)$ および $C_0(t)$ の定義はそれぞれ

$$C_m(t) = (1/h) \int_0^h C(z, t) dz, \quad C_0(t) = C(0, t) \quad (8-26)$$

であり、厳密には $C_m(t)$ および $C_0(t)$ を求めるためには、非平衡時の $C(t)$ の鉛直分布が必要ということになり、結局、式 (8-20) に逆戻りしてしまう。ここでは、式 (8-21) の出現の背景を重視し、 $C(z, t)$ の分布形は時間的に相似で、定常状態の基礎方程式

$$\partial\{E_z(\partial C/\partial z)\}/\partial z + w_0(\partial C/\partial z) = 0 \quad (8-27)$$

で与えられる分布形で近似できると仮定する。底泥粒子の浮上がない場合は $P_m = 0$ となり、式 (8-24) は

$$\partial C/\partial z|_{z=0} = 0 \quad (8-28)$$

となる。この場合の分布形は模式的には図 8-4 の破線のようなになる。ここで、図 8-4 の実線は式 (8-27) を満足する平衡状態での模式的な分布形とする。一方、浮上量 P_m が $P_m > w_0 C_0(t)$ の場合には、水底面近傍での濃度勾配は平衡状態の場合より大きくなり、図 8-4 の一点鎖線のような分布形になると考えられる。即ち、式 (8-27) から求められる $C_0(t)$ の値は、 P_m が $0 < P_m < w_0 C_0(t)$ の場合には過大評価となり、 $P_m > w_0 C_0(t)$ の場合には過少評価となる。よって、式 (8-25) により求められる C_m の時間変動にはその影響が現れることになるが、現地観測の精度を考慮に入れば、分布形に関する今回の仮定は許容されるものと考えられる。

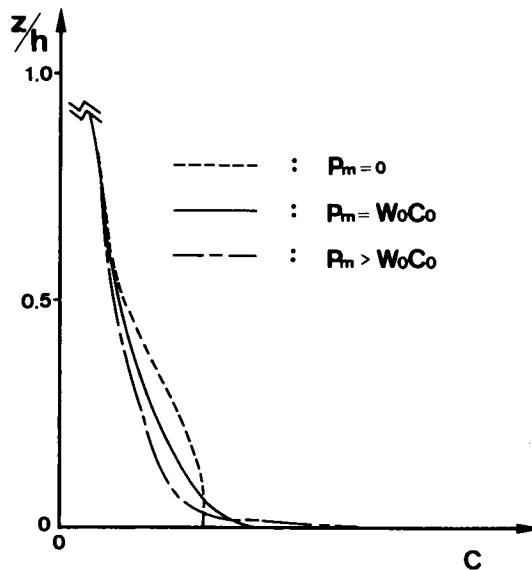


図 8-4 鉛直濃度分布形の比較

次に拡散係数 E_z についてふれる。剪断乱れ場での E_z は壁面や水表面で小さく、主流部で大きい特性がある。これは、壁面や水表面では水粒子の運動が制限されるためと説明される。いま E_z の分布として、対数型流速分布にもとづく

$$E_z = \beta u_* \kappa z(1-z/h) \quad (8-29)$$

を考えれば、濃度の鉛直分布形は $C(z)$

$$C(z)/C_a = \{(h-z)/z\}^{z/a} \{a/(h-a)\}^{z/a}, \quad z_a = w_0/(\beta u_* \kappa) \quad (8-30)$$

で表される Rouse型分布となる。⁹⁾ ここで β は底泥粒子の拡散に関する比例定数、 κ はカルマン定数、 C_a は $z = a$ での濃度で規準面濃度と呼ばれる。この場合、 $a \neq 0$ が条件となる。

また、式 (8-29) で与えられる E_z の断面平均値 \bar{E}_z を考え、拡散係数が水深方向に一定とした取り扱いもしばしばなされる。この場合 $\bar{E}_z = \beta u_* \kappa h/6$ となり、 $C(z)$ は

$$C(z)/C_0 = \exp\{-6w_0 z/(\beta u_* \kappa h)\} = \exp(-6z_a z/h) \quad (8-31)$$

なる指数型分布となる。ここで C_0 は $z = 0$ での濃度であり、 $\bar{E}_z|_{z=0} \neq 0$ であるために定義が可能となる。

E_z として式 (8-29) を用いた場合の問題点は $z = 0$ に規準面をとれないことである。また、Rouse型分布の場合、 $a \rightarrow 0$ とすると、 $C_a \rightarrow C_0 \rightarrow \infty$ となり、式 (8-25) の右辺は P_m が無限大でない限り常に負となり、底泥の浮上があっても湖内の濁度は全く上昇しないことになる。Rouse型分布の場合、 a/h を 0.04 程度にとれば、式 (8-31) の指数型分布とほぼ同じ特性を示すが*、この場合には水深 h が大きくなると

$$E_z (\partial C / \partial z) |_{z=a} = -P_m \quad (8-32)$$

の成立が難しくなり、式 (8-25) で $C_0 = C_a$ とした物質収支式は成立しないことになる。一方、 $E_z = \text{const.}$ とした場合には、その仮定の妥当性、特に壁面付近での $\bar{E}_z = \beta u_* \kappa h/6$ なる値が問題となる。このように、二つの分布形は互いに問題点を含んでいる。

8.3.2 規準面と規準面濃度について

拡散係数 E_z の分布形として

$$E_z = \beta \nu + \beta u_* \kappa z(1-z/h) \quad (8-33)$$

* APPENDIX A を参照のこと

を考えれば、この分布形は E_z の値が境界付近で小さく主流部で大きいという特性を満足し、かつ規準面を $z = 0$ で定義できる。ここで、 ν は水の動粘性係数である。ただ、 E_z を式(8-33)で与えた場合、式(8-27)を満足する濃度分布形は解析的には表現できず少し不便である。そこで、主に便宜上の理由から E_z の分布形を式(8-33)を基に次のように仮定する。

$$E_z = E_{z1} = \beta \nu \quad 0 \leq z \leq a \quad (8-34a)$$

$$E_z = E_{zu} = \beta u_* \kappa z(1-z/h) \quad a \leq z \leq h \quad (8-34b)$$

式(8-34)は、 $z \rightarrow 0$ では $\beta \nu \gg \beta u_* \kappa z(1-z/h)$ であり、 z が大きくなるにつれて $\beta \nu \ll \beta u_* \kappa z(1-z/h)$ を考慮したものである。これによれば、濃度分布形 $C(z)$ は図 8-5 のようになる。

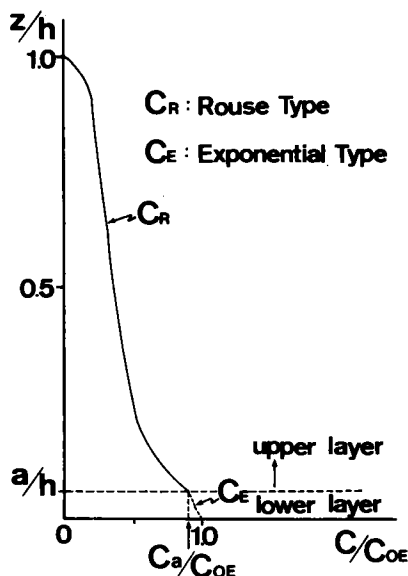


図 8-5 濃度分布形モデルに関する説明図

即ち、 $C(z)$ は $0 \leq z \leq a$ の下層部では指数型濃度分布を、 $a \leq z \leq h$ の上層部では Rouse 型濃度分布をすると考える。この濃度分布形は $z = a$ において $C(z)$ の値は連続であるが微分不可能となる。しかし、今回の解析において濃度分布形を時間的に相似と近似したこと自体かなり大胆な仮定であるので、 $C(z)$ に対するこの程度の近似は許容され则认为られる。ここで C_{mu} および C_{ml} をそれぞれ上層 ($a \leq z \leq h$) および下層 ($0 \leq z \leq a$) での断面平均濃度とすると、式(8-25)は次のように書き改められる。

$$(h-a)(\partial C_{mu} / \partial t) + a(\partial C_{ml} / \partial t) = R_m - w_0 C_0 \quad (8-35)$$

上および下層の接界面 a の位置は

$$E_{zu}(a) = E_{zi}(a) \quad (8-36)$$

の条件で決めることにすれば、 a は次の関係式から求められる。

$$\nu = u_* \kappa a(1-a/h) \quad (8-37)$$

a が微小な場合、 $1-a/h \div 1$ となるので、 a は結局

$$a = \nu / (u_* \kappa) \quad (8-38)$$

で近似される。 a の値と粘性底層厚 δ_l ($= 5\nu/u_*^{91}$) との比を求めると

$$a/\delta_l = 1/(5\kappa) = 0.5 \quad (\kappa = 0.4) \quad (8-39)$$

となり、 a の位置は粘性底層内に存在することになる。8. 2 節での $\tau_i = 0.01\text{N/m}^2$ を受けて $u_* = u_{i*} = 3.2\text{mm/s}$, $w_0 = 0.46\text{mm/s}$ (粒径: $25.7\mu\text{m}$, 比重: 2.28) とすれば a の値は約 0.84mm となる。

式 (8-35) を実際に解くためには、式 (8-35) を C_0 に関する微分方程式に書き改めればよいのであるが、観測地点 (深さ) は上層に位置し、その濃度 C_{0b} は式 (8-30) で C_a と関係づけられているので、ここでは式 (8-35) を C_a に関する式に書き改めることとする。

まず $C_a/C_0 (=k_e)$ の関係は式 (8-31) において $z = a$ と置くことにより求められる。次に、 $(h-a)C_{mu}$ と aC_{mi} を C_a により表現することにする。

$$M_{aR} = (h-a)C_{mu} = \int_a^h C_R dz = \int_0^h C_R dz - \int_0^a C_R dz \quad (8-40)$$

を考える。ここで、 C_R は式 (8-30) で与えられる Rouse 型分布である。よって

$$M_{TR} = \int_0^h C_R dz = C_a h \{t_a/(1-t_a)\}^{z_*} \int_0^1 \{(1-t)/t\}^{z_*} dt \quad (8-41)$$

$$M'_{TR} = \int_0^a C_R dz = C_a h \{t_a/(1-t_a)\}^{z_*} \int_0^{t_a} \{(1-t)/t\}^{z_*} dt \quad (8-42)$$

となる。ここで、 $t = z/h$ および $t_a = a/h$ である。 $0 < z_* < 1$ の場合、 M_{TR} および M'_{TR} の積分項はそれぞれ完全ベータ関数、不完全ベータ関数となり積分可能である。¹⁰⁾ $u_* = 3.2\text{mm/s}$, $w_0 = 0.46\text{mm/s}$ の条件では $z_* = 0.3$ であるので、 M_{TR} および M'_{TR} はそれぞれ

$$M_{TR} = C_a h \{t_a/(1-t_a)\}^{z_*} \Gamma(1+z_*) \Gamma(1-z_*) \quad (8-43)$$

$$\begin{aligned}
M'_{TR} &= C_a h\{t_a/(1-t_a)\}^{z_*} \{t_a^{1-z_*}/(1-z_*)\} [\Gamma(2-z_*)/\{\Gamma(1-z_*)\Gamma(-z_*)\}] \\
&\quad \cdot \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \{(t_a^n/n!)\Gamma(1-z_*+n)\Gamma(-z_*+n)/\Gamma(2-z_*+n)\} \right\} \\
&= C_a h\{t_a/(1-t_a)\}^{z_*} F(1-z_*, -z_*, 2-z_*; t_a)
\end{aligned} \quad (8-44)$$

となる。ここで $\Gamma(x)$ はガンマ関数、 $F(a, b, c; z)$ は超幾何関数である¹⁰⁾。また aC_{ml} は

$$aC_{ml} = \int_0^a C_E dz = \{C_a E_{Zl}/(k_e w_0)\} \{1 - \exp(-w_0 a/E_{Zl})\} \quad (8-45)$$

で表わされる。ここで C_E は式 (8-31) で与えられる指数型分布である。

式 (8-34) と式 (8-43) , 式 (8-44) および式 (8-45) を式 (8-35) に代入して整理すれば、物質収支式が C_a に関する微分方程式の形に改められる。

$$\begin{aligned}
&h\{t_a/(1-t_a)\}^{z_*} \Gamma(1-z_*)\Gamma(1+z_*)(\partial C_a/\partial t) \\
&- h\{t_a/(1-t_a)\}^{z_*} F(1-z_*, -z_*, 2-z_*; t_a)(\partial C_a/\partial t) \\
&+ \{\beta \nu/(k_e w_0)\} [1 - \exp\{-w_0 a/(\beta \nu)\}](\partial C_a/\partial t) = R_m - w_0 C_a/k_e
\end{aligned} \quad (8-46)$$

式 (8-46) を解けば、 C_a の時間変動が求められる。 $z = h_{ob}$ での濃度 C_{ob} の時間変動は、この $C_a(t)$ を式 (8-30) に代入して、 $z = h_{ob}$ とすることによって求められる。

第 8.4 節 底泥層内の含水比の鉛直分布の影響¹¹⁾

ここでは、含水比の鉛直分布が底泥の再浮上現象に及ぼす影響を、底泥床高の時間的変化を例にとって検討する。簡単のため、流れは時間的に変化せず、浮上した粒子の流下距離は無限大とする。この場合、底泥床面の連続式は次式となる。

$$dz/dt = A_1 d_0 p_m = (A_1 A_2/A_3)(R_m/\rho_0) \quad (8-47)$$

ここで、 z は底泥床の高さ、 A_1 、 A_2 および A_3 は粒子の形状係数、 d_0 および ρ_0 はそれぞれ飛び出し時の粒子の代表的粒径および密度、 p_m は飛び出し率 (次元: $[T^{-1}]$)、 R_m は飛び出し量 (次元: $[MC^2 T^{-1}]$) である。 dz/dt は洗掘速度 (erosion rate) と呼ばれる。

解析の便宜上、無次元飛び出し率の推定式を次式で近似する。

$$R_{m*} = (\eta_1/\tau)(A_2/A_3)\{R_m/(\rho_0 d_0)\} = A(\tau/\tau_{c2})^\lambda \quad (\text{for } \tau/\tau_{c2} < 1) \quad (8-48)$$

ここで、 τ_c は破壊限界値、 A および λ は比例常数である。式 (8-48) を式 (8-47) に代入し、さらに図 3-12 をもとに、 $\tau_{c2} = \alpha \tau_{r1}$ (τ_{r1} : 降伏値、 α : 比例常数) と近似して整理

し、無次元表示すると

$$dz'/dt' = A_1 A(d_0/z_0) \{ \tau / (\alpha \tau_0) \}^{\lambda+1} (\tau_1/\tau_0)^{-\lambda} (\eta_1/\eta_0)^{-1} \quad (8-49)$$

となる。ここで、 $z' = z/z_0$ 、 $t' = (\alpha \tau_0 / \eta_0) t$ 、 z_0 は基準河床深さ、 τ_0 および η_0 はそれぞれ $z = z_0$ における τ_1 および η_1 の値である。式 (8-49)の τ_1 および η_1 は深さ方向に含水比とともに変化するので、これらを深さの関数として表示する必要がある。まず、 τ_1 および η_1 と底泥濃度 C との関係を、実験結果より次のように近似する。

$$\tau_1 = k_1 C^m \quad (k_1, m : \text{実験常数}) \quad (8-50)$$

$$\eta_1 = k_2 C^n \quad (k_2, n : \text{実験常数}) \quad (8-51)$$

一方、含水比を濃度で置き換えた場合、或る深さまでは $C \propto z^l$ (l : 常数) が成立している (図 8-6 参照)。よって、 τ_1/τ_0 および η_1/η_0 は次のように z/z_0 の関数で近似される。

$$\tau_1/\tau_0 = (C/C_0)^m = (z/z_0)^{lm} \quad (8-52)$$

$$\eta_1/\eta_0 = (C/C_0)^n = (z/z_0)^{ln} \quad (8-53)$$

ここで C_0 は $z = z_0$ での底泥濃度である。式 (8-52)および式 (8-53)を式 (8-49)に代入し整理すれば、 dz'/dt' の関係式は

$$dz'/dt' = A_1 A(d_0/z_0) \{ \tau / (\alpha \tau_0) \}^{\lambda+1} z^{-l(\lambda m + n)} \quad (\tau/\tau_{c2} < 1) \quad (8-54)$$

となり、 t' について容易に積分できる形となる。 λ 、 m および n の値として、図 4-14から $\lambda = 5$ 、図 5-4 および図 5-6の横軸を濃度 C に直した結果から、 $m = n = 4$ とする。 l に対して

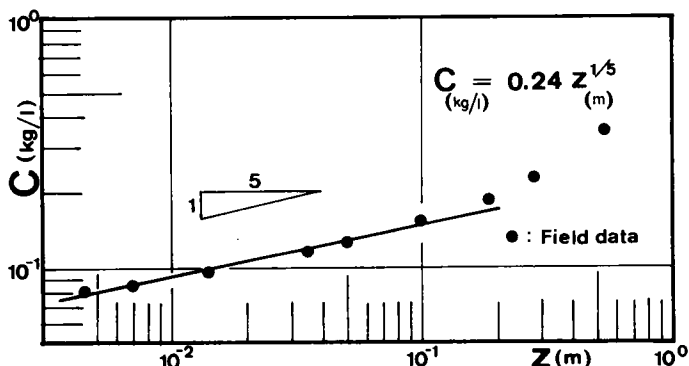


図 8-6 底泥濃度の鉛直分布の実測例

は、図 8-6に示す霞ヶ浦での現地データより、 $l = 1/5$ とした。 $\{l(\lambda m+n)+1\} = 29/5$ を 6 と近似すれば、 z' の時間変化は次式となる。

$$z' = (6A_1 Ad_0/z_0)^{1/6} \{ \tau / (\alpha \tau_0) \} t^{1/6} \quad (\tau / \tau_{c2} < 1) \quad (8-55)$$

式 (8-55)は、底泥が図 8-6 のような濃度変化している場合には、底泥路床の低下量（すなわち、底泥の浮上厚さ）は時間の $1/6$ 乗に比例することを示す。底泥路床下での底泥濃度が鉛直方向に一定の場合には路床低下量が時間に正比例するのに比べて、底泥濃度が深さ方向に増加している場合には路床低下速度が大幅に減少することがわかる。

また、式(8-55)は、同じ時刻での路床低下量は $\tau / \alpha \tau_0$ に比例することも示しているが、この関係は路床下での底泥濃度が一樣の場合には路床低下量が $\tau / \alpha \tau_0$ の 6乗に比例するのとは大きな違いである。流れのせん断応力の大小による浮上厚さ変化は、路床下での底泥濃度が深さ方向に増加している場合には一樣濃度分布の場合に比べてかなり小さくなることがわかる。以上の考察で、路床下での底泥濃度（含水比）の鉛直方向変化は底泥の再浮上現象に大きな影響を及ぼすことが明らかとなったが、現地の条件によっては、浮上量を推定する際、含水比の鉛直方向変化を考慮した解析が必要となると考えられる。

第 8.5 節 底泥の再浮上に関するシミュレーション

これまでに得られた知見を基に、霞ヶ浦高浜入湾奥部を対象として底泥の再浮上現象のシミュレーションを行った。本節では、その手順および結果について述べる。シミュレーションにおいては、風速の時間変動を入力として与え、深さ0.3mでの濁度および底泥の浮上厚（洗掘深）の時間変化を出力として得ようとした。応答関数に対応するものが、これまでに求めてきたサブシステムI, II, IIIおよびIVに関する数理モデルということになる。ここでは、まずシミュレーションの具体的な手順について説明し、次にシミュレーションの具体例を示し、現地観測結果との比較などを通してシミュレーション結果について考察する。

現地での底泥粒子の粒度分布や比重分布にはある幅があり、これらの影響を加味したい場合には、各粒度および比重別に計算を行って重ね合わせの手法を用いればよい。また植物プランクトンのように粒径や比重が時間的に増減する場合には、新たな検討が必要となる。ここでは均一で時間的変化のない固体粒子を想定した。

8.5.1 シミュレーションの手順

シミュレーションにあたって、底泥層内の含水比の鉛直分布を反映させて限界掃流力 τ_{c2} や底泥の粘度 η_1 について、その鉛直方向変化を考慮に入れた。また底泥床面に作用するせん断応力を、平均値が風速によって決められる正規分布型確率変数として与えた。

濁度や浮上厚さの時間変動は 30分間隔で計算したが、実効掃流力 τ_0 の値は 1分毎に与えた。具体的な手順は次のとおりである。

- ① st.1 での含水比の鉛直分布の実測データを参照して、圧縮指数 $C_c = 3.0$ 、境界条件

表 8-2 底泥層内での底泥の粘度と限界掃流力の鉛直分布

| z (mm) | C (kg/l) | w (%) | η_1 (Pa.s) | τ_{C2} (N/m ²) |
|-------------|---------------|------------|--------------------|------------------------------------|
| 0.0 - 0.5 | 0.124 | 760 | 0.05 | 0.07 |
| 0.5 - 1.0 | 0.137 | 690 | 0.08 | 0.11 |
| 1.0 - 2.5 | 0.151 | 620 | 0.12 | 0.15 |
| 2.5 - 5.0 | 0.158 | 590 | 0.17 | 0.21 |
| 5.0 - 10.0 | 0.172 | 540 | 0.23 | 0.26 |
| 10.0 - 20.0 | 0.183 | 500 | 0.28 | 0.32 |

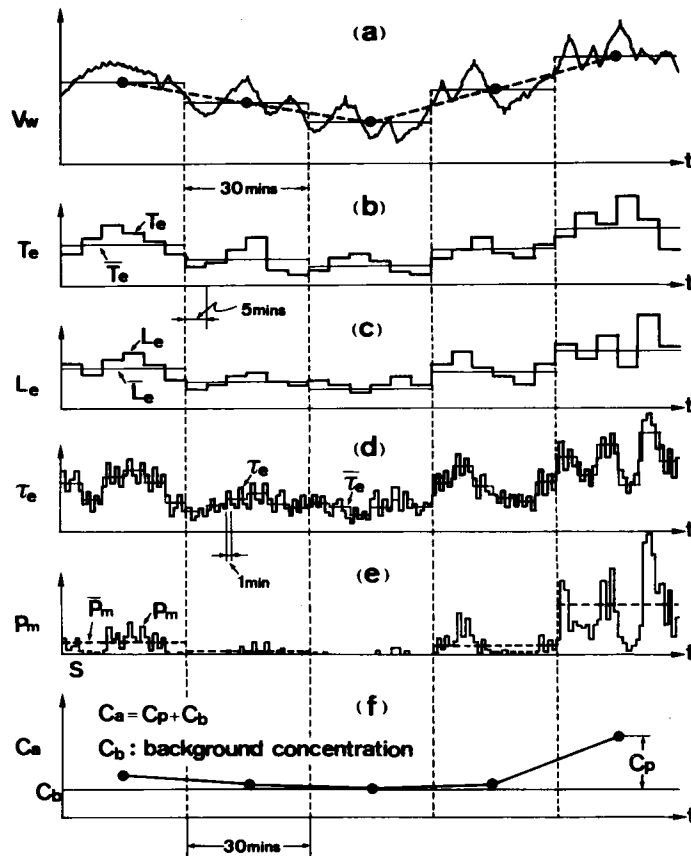


図 8-7 実効掃流力の時系列を与える手順の説明図

$H_{00} = 0.1 \text{ m}$ で $p_{s01} = 122 \text{ N/m}^2$, $C_1 = 0.24 \text{ kg/l}$ とし、式 (6-16) から含水比の鉛直分布を計算する。これをもとに底泥層を表 8-2 に示すように分割し、さらに各層での η_1 および τ_{c2} の値を図 5-4 および式 (3-4) を基に求め、表 8-2 に併示した。

② 突効掃流力は以下の手順で与える。入力としての風速のデータは 30 分毎にしか解析していないので、風速は図 8-7 (a) のように 30 分毎に一定値で与え、30 分間内の風速変動の影響は有義波浪の表現として考慮されているものとする。8.2.1 で述べたように湖面上の波浪を有義波で代表させ、その有義波の波高 H_0 および周期 T_0 をそれぞれ平均値とし、変動係数が α_H および α_T である正規分布型の確率変数として不規則波を考え、ここでは 5 分毎に離散的に与える (図 8-7 (b), (c) 参照)。(30 分間内で有義波に変動を考えたのは、先にふれた 30 分間内の風速変動の影響を考慮したと同時に、風速と有義波の関係に内在するバラツキを考慮したものである。) 30 分間の平均値 \bar{H}_0 および \bar{T}_0 は、それぞれ式 (7-6) 及び式 (7-7) から計算する。5 分毎に確率変数として与えられる波高 H_0 と周期 T_0 に対応する突効掃流力 $\tau_0(t)$ は 8.2.1 に述べた手順で求められた平均値 $\bar{\tau}_0$ を持つ変動係数 α_T の正規分布型確率変数として 1 分毎に再現して計算に供する (図 8-7 (d) 参照)。

③ 与えられた突効掃流力の値と表 8-2 に示す限界掃流力 $\tau_{c2}(z)$ と粘度 $\eta_1(z)$ の値を、飛び出し率の推定式である式 (4-33) に代入して、1 分間毎の飛び出し量 $P_m(t)$ を計算する。さらにこの $P_m(t)$ の 30 分間平均値 \bar{P}_m を求めて、この \bar{P}_m の値と物質収支式を用いて $z = a$ での濁度 C_a の時間変動を 30 分毎に計算する (図 8-7 (e), (f) 参照)。

④ 観測点での濁度 C_{00} は C_a の値と式 (8-30) を用いて計算する。底泥の浮上厚 z_s は、水中に浮遊している単位面積当たりの底泥粒子の全量 M_T を計算し、次に示す関係式から逆算する。

$$z_s = (M_T / \sigma) (1 + w/100) \quad (8-56)$$

この際、含水比は $w = 590\%$ で一定とした。ここで、 σ は底泥粒子の真の密度である。

8.5.2 シミュレーション結果の考察¹²⁾

想定した底泥粒子の特性は、粒径 $26 \mu\text{m}$ 、比重 2.28 および沈降速度 0.46 mm/s である。湖内での鉛直分布形を与える $z_w (= w_0 / \beta u_* \kappa)$ の値は $\beta = 1.2$, $\kappa = 0.4$ および $u_* = 3.2 \text{ mm/s}$ として $z_w = 0.3$ とした。水深は 2.5 m 、観測点の深さは 0.3 m である。また、確率変数 H_0 , T_0 および τ_0 に対する変動係数は、それぞれ $\alpha_H = 0.025$, $\alpha_T = 0.025$ および $\alpha_\tau = 0.5$ で一定とした。今回のシミュレーションにあたっては、物質収支式としての式 (8-46) をさらに簡略化して次式を用いた。

$$h\{t_a/(1-t_a)\}^{z_w} \Gamma(1-z_w) \Gamma(1+z_w) (\partial C_a / \partial t) = P_m - w_0 C_a / k_e^{**} \quad (8-57)$$

^{**} APPENDIX B を参照のこと

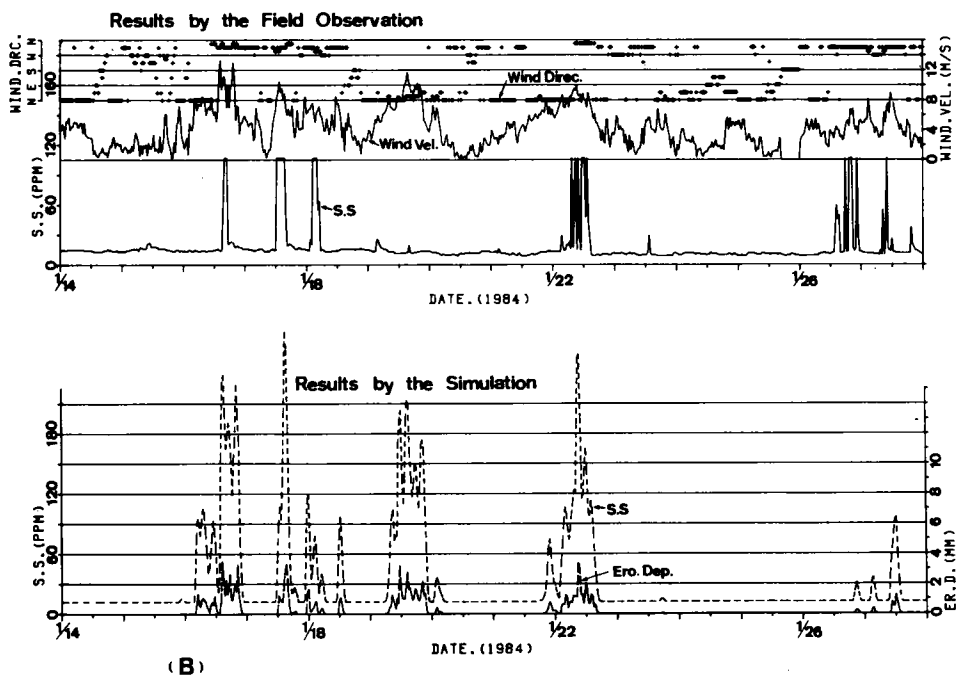
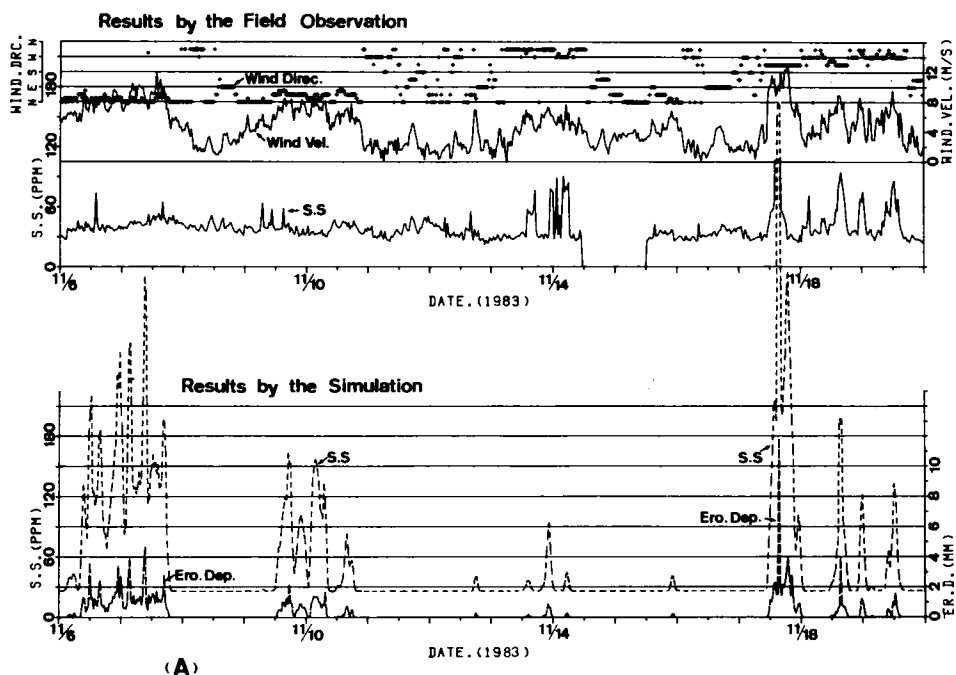


図 8-8 濁度，風速，風向および浮上厚の時間変化（実測値と計算値の比較）

図 8-8 は上記の条件で行った濁度($z = 0.3 \text{ m}$)および浮上厚の時間変動のシミュレーション結果である。同図には風向、風速、濁度の現地観測データを併示した。(A)が 1983 年 11 月 6 日から 11 月 19 日、(B)が 1984 年 1 月 14 日から 1 月 28 日までの結果である。

濁度について実測値と計算値を比較すると、風速が 10 m/s を越すと計算値は必ず 200 ppm を越える高い値となるが、実測値は必ずしもそうはならない。この原因は風向にあると考えられる。風速が 10 m/s を越えても濁度が $10 \sim 20 \text{ ppm}$ 程度しか上昇していない実測データの場合、風向は N~NE となっている。N~NE の風向の風は、観測ステーションの位置の関係で、吹送距離が 200 m 程度と短い。さらに観測ステーションの NE 方向に、約 400 m^2 の規模の実験施設がわずか数 m 離されて保留されており、これによる消波効果が大きい。以上の二つが、N~NE 方向の風の速度が 10 m/s を越えても、高い濁度が観測されなかった理由と考えられる。この考察を裏付けるデータとして、N~NE 方向以外の風が 10 m/s を越す場合には 110 ppm という高い濁度が観測されている。なお、濁度の実測値が 110 ppm を越さないのは、この値が計測精度が保証される最大値であるためで、出力値としてはもっと高い値が記録されており、実際の濁度は 110 ppm よりかなり高かったと推察される。N~NE 方向の風のデータを除いて、実測値と計算値の相関係数を求めたところ 0.67 とかなり高い値となり、今回のシミュレーションは妥当なものだと判断される。

実測された濁度と風速との関係は 7.5.4 で述べたが、その特徴はシミュレーションでも再現できた。即ち、濁度は風速が 8 m/s を越すあたりから急激に上昇し始め、風が 6 m/s 以下に収まると 1~2 時間以内にもとの濁度まで下降する。浮上厚の計算結果は、風速が 12 m/s あたりで $2 \sim 7 \text{ mm}$ 程度の値となった。これによると、高浜入では、風の強い日には数 mm 程度の底泥が浮上する可能性があり、これに伴い底泥間隙水中の栄養塩類が水圏へ拡散することが予想される。

最後に、各確率変数の変動係数 α_H 、 α_T および α_r の値、さらには底泥の限界掃流力 τ_{c2} および粘度 η_1 の鉛直分布が、シミュレーション結果に及ぼす影響について述べる。 α_H および α_T が 0.05 以下であれば、計算結果には大きな変化は現れない。それ以上になると、風速が 10 m/s を越すあたりから、計算値は 500 ppm をはるかに越す濁度を示すことが多くなる。また α_r については、 $\alpha_r < 0.3$ では風速が 6 m/s 程度ならば底泥は全く浮上しない結果となり、 $0.5 < \alpha_r < 1$ では α_r の増加と共に風速が 6 m/s 程度で濁度の上昇が見られ、濁度の変動も若干大きくなる傾向がある。シミュレーション結果に及ぼす影響は、底泥の限界掃流力 τ_{c2} および粘度 η_1 の鉛直分布によるものが最も大きい。底泥が $w = 590\%$ 、 $\tau_{c2} = 0.21 \text{ N/m}^2$ 、 $\eta_1 = 0.17 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ で鉛直方向に一様とすると、風速が 7 m/s 以下では底泥の浮上は全くなく、逆に 10 m/s あたりから濁度は 1000 ppm を越し、浮上厚さは数 cm という過大な値となった。底泥の含水比、限界掃流力および粘度の鉛直分布に対する計算結果の感度は 5 mm 以浅において高く、それ以深では低いので、表 8-2 のような底泥層の分割法が有効であった。

第 8.6 節 結 論

本章では、霞ヶ浦高浜入を対象とした、底泥の再浮上に関するシミュレーションについて

述べた。シミュレーションを行うに先立ち、残された課題サブシステムについて簡単な数理モデルを与えた。まず、サブシステム III の湖内の流れについては、それを底面せん断応力で評価することにしその方法について論じた。霞ヶ浦での底泥の再浮上の主な要因は、風により誘起された波浪と考えられるため、波浪による交番性のせん断応力を実効掃流力で評価した。その際、湖面には微小振幅波理論が適用できる規則波のみが存在するとし、その波高および周期は、第 7. 5 節で求めた霞ヶ浦高浜入での波浪の推定式より求めた。また、今回のシミュレーションでは、波浪による底面せん断応力の大きさを与えるいくつかの提案式のうち、層流境界層理論によるもので近似した。

サブシステム IV の湖水中での底泥粒子の挙動については、それを濁度の鉛直分布の形で表現することにした。濁度の断面平均値に関する鉛直方向のみの物質収支式を導き、それを規準面 ($z = a$) での濃度 C_a に関するものに直してその時間変化を求めた。任意深さ (例えば、 $z = h_{ob}$) での濃度の時間変化 $C_{ob}(t)$ については、濁度の鉛直分布形が定常状態でのそれで近似できると仮定して、定常状態での分布形と C_a の値から求めた。この際問題となるのが水底付近での境界条件であるが、これについては 8.3.2 で論じた。結論的には、次のようなものである。①. 水底 ($z = 0$) で境界条件を考え、式 (8-24) で与える。②. 断面平均の物質収支式を式 (8-25) で考える。③. 拡散係数を $z \leq a$ では $\beta \nu$ で、 $z \geq a$ では $\beta U_{* \kappa} z(1-z/h)$ で与え、 $z = a$ で接続させる。④. 与えられた拡散係数を用いて、式 (8-25) を規準面濃度 C_a で表現する。

4 節では、底泥層内の含水比の鉛直分布が底泥の再浮上現象に及ぼす影響を、洗掘深 z_s の時間変化 (clear water scour の条件) を例にとり検討した。洗掘深は泥層内の含水比が一樣な場合には時間に正比例して増加するが、含水比が鉛直方向に低下している場合には時間の $1/6$ 乗に比例することを導き、含水比の鉛直分布の影響がかなり大きいことを示した。

5 節では、底泥の再浮上に関するシミュレーションの具体例を示した。濁度についての実測データとシミュレーション結果の相関係数は 0.67 とかなり高く (風向が N~NE 方向のデータは除く)、シミュレーションの妥当性が確認された。今回のシミュレーションによれば、12m/s 程度の風が吹けば、湖内の濁度は 200~300ppm 程度に上昇し、底泥の浮上厚は数 mm にまでおよぶことになる。

今回のシミュレーションでは、波浪とせん断応力を正規分布型の確率変数として与えたので、各確率変数の分布の広がりを変動係数で評価して、それがシミュレーション結果に及ぼす影響を検討した。また、底泥の限界掃流力 τ_{c2} および粘度 η_1 の鉛直分布がシミュレーション結果に及ぼす影響についても論じた。含水比が一樣分布の場合には風速が 7m/s 以下では全く底泥の浮上がなく、逆に風速が 10m/s あたりでは濁度が 1000ppm を越し、浮上厚が数 cm にも及ぶ過大な値となった。シミュレーション結果は、底泥の限界掃流力および粘度の鉛直分布に対する反応が大きく、特に 5mm 以浅でのそれらの分布形に対して敏感であった。

APPENDIX A

定常状態での Rouse 型分布と指数型分布との断面平均濃度 C_m および観測深さ ($z = 0.3 \text{ m}$)

での濃度 C_{ob} を比較する。両者の C_m は次式で定義される。

$$\text{Rouse型} \quad C_{mR} = C_{aR} \{a/(h-a)\}^{z_*} \Gamma(1-z_*) \Gamma(1-z_*) \quad (z_* < 1) \quad (A-1)$$

$$\text{指数型} \quad C_{mE} = C_{oE} (1/6z_*) \{1 - \exp(-6z_*)\} \quad (A-2)$$

ここで、 C_{aR} は Rouse型分布における $z = a$ での濃度、 C_{oE} は指数型分布における $z = 0$ での濃度、 $\Gamma(x)$ はガンマ関数 である。いま、

$$C_{oE} = P_m / W_0 \quad (A-3)$$

で与え、 $C_{aR} = C_{oE}$ とした場合 (図 A-1 参照) の C_{mR}/C_{mE} および C_{obR}/C_{obE} と a/h との関係を図 A-2 に示す。図 A-2 より、 C_{mR}/C_{mE} および C_{obR}/C_{obE} は、 a/h が小さくなるほど小さくなり、Rouse 型分布と指数型分布の違いが顕著となるが、 z_* が小さい場合にはその度合いは少ないことがわかる。

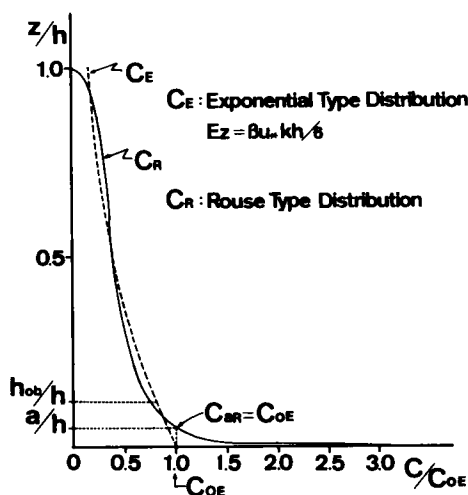


図 A-1 C_{aR} と C_{oE} の説明図

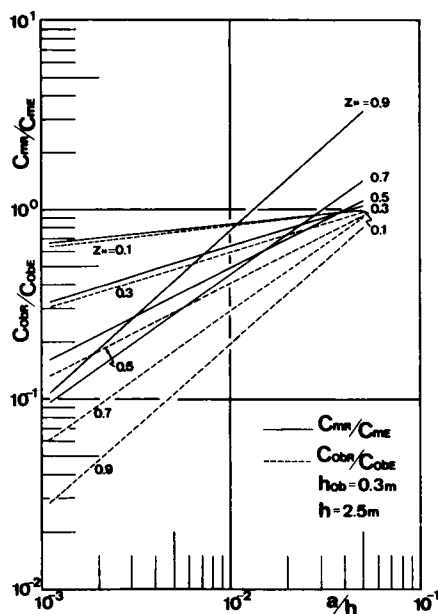


図 A-2 指数型分布とRouse型分布の比較

APPENDIX B

式 (8-46) は計算に不便なため簡略化を考える。まず、 $(h-a)C_{m1}$ と aC_{m1} の大きさを比較する。 $u_* = 3.2\text{mm/s}$, $w_0 = 0.46\text{mm/s}$, $\beta = 1.2$, $\kappa = 0.4$ および $a = 0.84\text{mm}$ の条件で、 $(h-a)$

C_{mu}/aC_{ml} の値を計算すると 402 となり $(h-a)C_{mu} \gg aC_{ml}$ が成立する。少なくとも $z_* < 0.3$ では式 (8-46) の左辺第三項は第一項に比して無視できる。また図 B-1 は z_* をパラメータとして、 M_{aR}/M_{TR} と a/h の関係を示したものである。 $z_* < 0.5$, $a/h < 0.05$ であれば、 $M_{aR} \doteq M_{TR}$ の近似が許されよう。結局、式 (8-46) は

$$h \{t_a/(1-t_a)\}^{z_*} \Gamma(1-z_*) \Gamma(1+z_*) (\partial C_a / \partial t) = P_m - w_0 C_a / k_e \quad (B-1)$$

となる。この近似式は $z_* < 0.5$, $a/h < 0.05$ であれば、式 (8-46) に換わって利用できる。

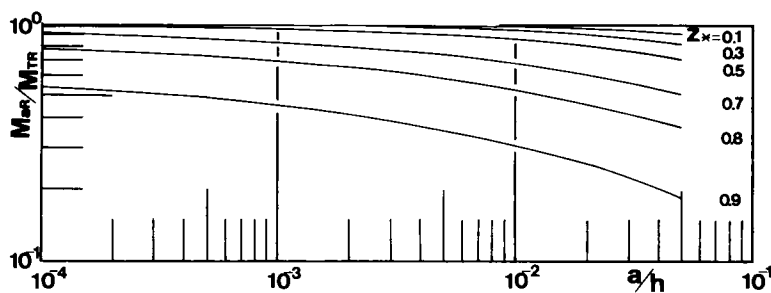


図 B-1 M_{aR}/M_{TR} と a/h の関係

参考文献

- 1) Sheng, Y.P. and W. Lick (1979): The transport and resuspension of sediments in a shallow lake, J. Geophys. Res., 84(C4), 1809-1826.
- 2) 例えば、首藤伸夫 (1981): 新体系土木工学 24 海の波の水理, 技報堂。
- 3) Raudkivi, A.J. (1976): Loose Boundary Hydraulics 2nd Edition, Pergamon Press, 262-281.
- 4) Kajiura, K. (1964): On the bottom friction in an oscillatory current, Bull. Earthq. Res. Inst., vol 42, 147-174.
- 5) Kajiura, K. (1968): A model of the bottom boundary layer in water waves, Bull. Earthq. Res. Inst., vol 46, 75-123.
- 6) Jonnson, I.G. (1967): Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th Conf. on Coastal Eng., 127-148.
- 7) 例えば、石原藤次郎編 (1972): 水工水理学, 丸善, 714-725.
- 8) 例えば、岩佐義朗 (1967): 朝倉土木工学講座 3 水理学, 朝倉書店, 246-250.
- 9) 例えば、白倉昌明・大橋秀雄 (1969): 流体力学 (2), コロナ社, 92-121.
- 10) 例えば、森口繁一・宇田川銑久・一松信 (1957): 数学公式集 III, 岩波書店。
- 11) 大坪国順・村岡浩爾 (1984): 底泥の飛び出し率の推定, 第28回土木学会水理講演会講演

論文集，671-677.

- 12) 大坪国順・村岡浩爾(1984)：霞ヶ浦における底泥物性分布および底泥再浮上に関する現地観測，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集第II部，409-410.

第9章 結 論

以上、本研究において底泥の再浮上過程を系統的に論じてきたが、その内容は三つの段階に大別される。第一の段階は、底泥の再浮上に関する基本量である限界掃流力および飛び出し率の特性、さらにそれに深く関連している底泥の流動特性や沈降特性についての実験室レベルでの研究である。第二の段階は、餌ヶ浦を対象とした底泥の堆積状態や再浮上の状態に関する現地レベルでの研究であり、最後の段階は、両レベルの研究で得られた知見をもとに、底泥の再浮上に関するシミュレーションモデルの構築、それによる現地での底泥の再浮上現象の再現、さらに進んで予測に関する研究である。本章では、その研究成果を要約し、本論文の結論とする。

第1章では序論として、まず本研究の背景について述べた。次いで本研究課題には四つの解明すべきサブシステムがあることを明らかにした上で、どれに重点を置くかを述べるとともに、研究対象の特徴をふまえながら研究方針について述べた。そのあとで本論文の構成についてふれた。

第2章では、限界掃流力や飛び出し率を求めるための流送実験の方法、実験条件および実験に用いた底泥の基本的物性について述べた。まず、流送実験の目的や必要性を既往の粘着性土の流送に関する研究をふまえて論じた。次に流送実験用装置、実験方法・手順および実験に用いた底泥の種類と含水比条件について述べた。そのあとで底泥の概観について述べ、底泥の基本的物性について論じた。

底泥は土壌とほとんど同じ成分構成であるが、水底に存在するために乾燥収縮に伴う物理化学的性質の変化が少なく比較的安定している。粒径と含水比をパラメータとして底泥をレオロジー的に分類すれば、底泥は多くの場合、粘弾性流体、ビンガム流体および非ニュートン流体と呼ばれるものに近いものとなる。基本的な物性としては、底泥はほとんどが細粒土に分類され、灼熱減量比は現地泥で10~20%程度、比重は2.1~2.6程度であった。液性限界値と塑性指数の関係はA-line近傍にあり、底泥は特殊な土ではないと言える。灼熱減量比が大きいほど比重は小さく液性限界が高い傾向があるが、これは有機物が底泥のせん断強度を高めていることを示唆するものである。

第3章では、底泥の限界掃流力に関する実験的および理論的研究について論じた。実験の結果から、底泥の浮上現象にたいして流送限界と破壊限界という二つの限界状態を定義した。また、底泥の流送時の形態の特徴から、底泥を二つのグループに分類した。第一底泥グループの流送形態の特徴は、明確な界面の存在および破壊前に現れる流れと直角方向の亀裂である。第二底泥グループのそれは、不鮮明な界面とモヤ状の縦縞の発生および河床に亀裂が生じないことである。限界掃流力値は実験的に粘度もしくは降伏値と一義的な関係が得られたが、その関係は二つの底泥グループで明確に異なった。さらに、沈降特性や流動特性においても両グループ間で違いが認められたため、二つの底泥グループの特徴を整理して表3-2に示した。

限界掃流力に関する理論的考察は第一底泥グループについて行った。その結果、底泥の初期移動形態としては滑動離脱が最も起こりやすいこと、また流送抵抗力としては粘着力が主要であることを示した。さらに、限界状態は静的な釣り合い状態で捉えるべきであるという考えより、破壊限界値を底泥の限界掃流力と定義すべきことを提案した。

第4章では、底泥の飛び出し率の推定について論じた。飛び出し量の実験結果を整理および検討した結果、底泥の飛び出し量を粒状体的に取り扱うことにした。底泥粒子に関する運動方程式と、流体力の変動を加味した考察から、第一底泥グループの底泥に対する無次元飛び出し率の推定式を導いた。この推定式は、底泥の種類や含水比の影響を包括し、実験結果とも良好に一致した。さらに、この推定式を用いることにより、底泥の流送限界のより合理のおよび客観的な定義が可能となった。

第5章では、底泥の流動特性について主に実験的な研究を行った。底泥の流動曲線は底泥を二つのグループに分類する上での有力な判断材料である。第一底泥グループの流動曲線の特徴は、降伏値の存在と流動曲線の急激な折れ曲がりであり、第二底泥グループのそれは、降伏値がなく流動曲線がベキ乗型となることである。底泥の流動曲線を評価するパラメータとして粘度と降伏値を取り上げ、それらに及ぼす底泥の種類、含水比および温度の影響などについて検討した。その結果、粘度および降伏値とも含水比の増加に伴い減少すること、同一含水比でも底泥の種類によって粘度や降伏値の値が異なることが明らかとなった。

第一底泥グループについては、粘度と降伏値は底泥の種類や含水比によらず、最終沈降体積比により推定できることがわかった。また、底泥の温度が $5\sim 30^{\circ}\text{C}$ の範囲であれば、底泥の流動曲線には有意な違いがないことも明らかになった。

第6章では、底泥の沈降特性に関する実験的および理論的研究を行った。沈降特性も二つの底泥グループの分類に有効な指標となる。第一底泥グループの沈降特性は、界面沈降を呈することであり、第二底泥グループのそれは、沈積面の出現と微細粒子が高い濃度で分散していることである。同一初期含水比条件でも、底泥の種類の違いにより二つの沈降形態に分かれる。その原因は土粒子に吸着する陽イオンの種類にあると推論し、吸着陽イオンを置換した沈降実験によりそれを実証した。吸着陽イオンが Na^+ 、 Li^+ ならば第二底泥グループ、それ以外の Ca^{2+} 、 Al^{3+} などであれば第一底泥グループの特徴を示すと結論した。

最終沈降状態についても考察した。最終沈降状態での底泥濃度（含水比）の鉛直分布を理論的に導くことは、現地での堆積状態を推定するために重要である。ここでは、底泥濃度の鉛直分布を与える支配方程式を導き、それに間隙比と圧密荷重の関係を与えて底泥濃度の鉛直分布形を求めた。さらに、その際導入した圧縮指数などのパラメータの値を実験結果を参照して求めた。

第7章では、露ヶ浦を対象とした底泥の物性分布に関する現地調査、および底泥の再浮上に関する現地観測の結果について論じた。

露ヶ浦の底質環境は泥深0.3m付近を境に大きく変化している。0.3m以浅では、各物性値の地域差が大きく有機物含有量も多いが、0.3m以深では、地域差がほとんどなく、有機物含有量と粒度は0.3m以浅に比してかなり小さかった。底泥層内の含水比の鉛直分布を考慮して、露ヶ浦での底泥の堆積速度を検討すると、 $0.6\sim 0.8\text{kgf}/(\text{m}^2\text{yr})$ 程度となった。0.3m以浅での底泥の量は露ヶ浦西浦全域（砂質部を除いた 117.7km^2 ）で乾燥重量で約600万t、湿潤重

量で約 3900万tとなり、これらは 60～85 年間で堆積したと推定される。

底泥の再浮上に関する現地観測の結果、底泥の再浮上の原因となるものは、風により誘起された波浪であり、潮流は付随的なものであることがわかった。観測地点付近での有義波の波高および周期と風速との関係は、Wilsonの風波の推定式で吹送距離を 1kmとすれば、ほぼ評価できることがわかった。潮流は、平均流速が10～20mm/sと小さく、風速との相関も非常に低かった。底泥の再浮上が原因と考えられる濁度の上昇は7～9月には 10ppm程度（台風時を除く）であったが、10～3月には、12 m/s 程度の風が吹き 110ppmを越えた。

第8章では、霞ヶ浦高浜入を対象とした底泥の再浮上に関するシミュレーションについて論じた。それに先立ち、残された二つのサブシステムに関して簡単な数理モデルを与えた。底泥の再浮上に関与する流れの状況を、実効掃流力で評価することにし、第7. 5節の結果をもとに、その実効掃流力を平均値が風速により変化する確率変数として与えた。また濁水中での底泥粒子の挙動は、濁度の平均値に関する鉛直方向のみの物質収支式から評価した。物質収支式を標準面 ($z = a$) での濃度 C_a を用いて表現したが、その際、水底 ($z = 0$) で境界条件を考え $E_z(\partial C/\partial z)|_{z=0} = -P_m$ とした。また拡散係数は $z \leq a$ で $\beta \nu$ ($\beta = 1.2$, ν : 水の動粘性係数)、および $z \geq a$ で $\beta u_* \kappa z(1-z/h)$ とし、 $z = a$ で接続させた。

次に、底泥層内の含水比の鉛直分布が再浮上現象に及ぼす影響を検討し、含水比が泥深方向に低下している場合には浮上量がかなり抑えられることを示した。

最後に、霞ヶ浦高浜入を対象として底泥の再浮上に関するシミュレーションを行い、実測データとの比較によりシミュレーションモデルの妥当性を示し、シミュレーションの結果から 12m/s程度の風が吹いた場合には湖内の濁度は 200～300ppm程度にまで上昇し、底泥の浮上厚は数mmに及ぶという予測を行った。また、シミュレーションの際導入した波浪およびせん断応力に関する変動特性や底泥の含水比の鉛直分布がシミュレーション結果に及ぼす影響について述べた。

以上、本研究では底泥の限界掃流力と飛び出し率の定式化を中心に、実験室および現地のレベルで底泥再浮上現象を体系的に論じてきたが、本研究の成果が今後の底泥再浮上現象のさらに進んだ研究の踏み台となり、底泥の浮上による水質汚濁等の環境問題を解決する上での一助となれば幸いである。

最後に、本研究の全過程にわたり、終始一貫して懇切な御指導を頂いた京都大学工学部 中川博次教授に深甚の謝意を表する次第である。また、本研究の目的を深く理解され、研究方針に適切な助言を賜った国立公害研究所水質土壌環境部 合田健部長、同部水質環境計画研究室 村岡浩爾室長に心から感謝の意を表します。

さらに本研究の遂行にあたり多くの貴重な助言や示唆を賜った当時の京都大学工学部助手（現在金沢大学工学部助教授） 辻本哲郎氏、国立公害研究所水質土壌環境部水質環境計画研究室 海老瀬潜一主任研究員、同部土壌環境研究室 高松武次郎主任研究員、同 向井哲研究員に謝意を表します。また、底泥や沈降物の採取および現地観測等に御協力頂いた国立公害研究所水質土壌環境部水質環境計画研究室 相崎守弘主任研究員、同 平田健正研究員、同 福島武彦研究員、同部地盤沈下研究室 岩田敏研究員および計測技術部水質計測研究室 河合崇欣主任研究員にも感謝致します。

その他実験に御協力頂いた当時の国立公害研究所技術部係員 小黑良二氏，国立公害研究所共同研究員の高野恒雄氏，同実習生の諸氏，ならびに現地観測等に御協力頂いた杉田純氏および星野和也氏，図面の作成等に御尽力頂いた十文字力三氏，若松真知子さん，宮崎恵子さんにも厚く御礼申し上げます。